



## Design requirements for ERD and ISCO: How close and how fast to achieve an effective remediation?

**Chambon, Julie Claire Claudia; Lemming, Gitte; Manoli, Gabriele; Broholm, Mette Martina; Christophersen, Mette; Binning, Philip John; Bjerg, Poul Løgstrup**

*Published in:*

Levering af reaktive stoffer i lavpermeable aflejringer - It's a contact sport!

*Publication date:*

2011

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*

Chambon, J. C. C., Lemming, G., Manoli, G., Broholm, M. M., Christophersen, M., Binning, P. J., & Bjerg, P. L. (2011). Design requirements for ERD and ISCO: How close and how fast to achieve an effective remediation? In *Levering af reaktive stoffer i lavpermeable aflejringer - It's a contact sport!* (pp. 21-32). ATV Jord og Grundvand. <http://www.atv-jord-grundvand.dk/>

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# LEVERING AF REAKTIVE STOFFER I LAVPERMEABLE AFLEJRINGER: "IT'S A CONTACT SPORT"

16. juni 2011



Sekretariatsleder Lisbeth Verner  
ATV-Fonden for Jord og Grundvand  
Bygning 115 - Bygningstorvet - DTU  
2800 Kgs. Lyngby  
Telefon 45 25 21 77  
E-mail: [atvlv@env.dtu.dk](mailto:atvlv@env.dtu.dk)  
Website: [www.atv-jord-grundvand.dk](http://www.atv-jord-grundvand.dk)  
Portal: [www.jord-grundvand.dk](http://www.jord-grundvand.dk)

Forsideillustration: Pilotprojekt, Vadsbyvej, Hedehusene, del af  
illustration fra fra Camilla Maymann Christensens indlæg  
**Tryk:** Rødgaard grafisk produktion

## Indholdsfortegnelse

	Side
KARAKTERISERING OG STIMULERING AF MORÆNELER/LERJORD Seniorforsker, ph.d. Knud Erik Klint, GEUS	1 - 10
METODER TIL LEVERING AF REAKTIVE STOFFER I LAVPERMEABLE AFLEJRINGER Civilingeniør, ph.d. Camilla Maymann Christensen, Region Sjælland	11 - 20
DESIGN REQUIREMENTS FOR ERD AND ISCO: HOW CLOSE AND HOW FAST TO ACHIEVE AN EFFECTIVE REMEDIATION? PhD student Julie Chambon, DTU Environment PhD Gitte Lemming, DTU Environment 1 Research Assistant Gabriele Manoli, DTU Environment Associate Professor Mette Broholm, DTU Environment MSc in Engineering, PhD Mette Christophersen, Region Syddanmark Professor Philip J. Binning, DTU Environment Professor Poul L. Bjerg, DTU Environment	21 - 32
AFPRØVNING AF 5 FORSKELLIGE DOKUMENTATIONSMETODER TIL SPREDNING I MORÆNELER Civilingeniør, ph.d. Thomas H. Larsen, Orbicon A/S Civilingeniør Pernille Palstrøm, Orbicon A/S Civilingeniør, ph.d. Nina Tuxen, Orbicon A/S Kresten L. Andersen, Orbicon A/S Michael Neuhausen, Fugro Civilingeniør Henriette Kern-Jespersen, Region Hovedstaden Civilingeniør, ph.d. Camilla Maymann Christensen, Region Hovedstaden Geolog Mads Terkelsen, Region Hovedstaden	33 - 50
FRAKTURERING – ET STIMULERENDE TILTAG Projektleder Hasse Moos, DONG Energy	67 - 74

*Abstracts vedrørende case-basaren (side 51 – 66) se næste side*

### ***Abstracts vedrørende case-basaren***

SOIL MIXING Seniorkonsulent Lisbeth Walsted, NIRAS A/S Projektleder Anna Toft, Region Hovedstaden Udviklingskoordinator Mads Terkelsen, Region Hovedstaden Projektchef Kim R. Jensen, Arkil Miljøteknik A/S	51 - 54
OLIEFJERNELSE I PRAKSIS Seniorprojektleder Jørgen Mølgaard Christensen, DGE	55 - 58
HVORDAN DOKUMENTERES INJEKTION I LAVPERMEABLE SILTEDE AFLEJRINGER Civilingeniør Bernt Grosen, COWI A/S	59 - 62
ERFARINGSOPSAMLING FRA 2 FULDSKALA APPLIKATIONER AF STIMULERET REDUKTIV DECHLORERING I MORÆNELER 5 ÅR EFTER INJEKTIONEN. ETABLERING AF REAKTIONSZONE, DONORFORDELING OG FORURENINGSFJERNELSE Civilingeniør, ph.d. Katerina Tsitonaki, Orbicon A/S Ph.d.-studerende Ida Damgaard, DTU Miljø Ph.d.-studerende Julie Chambon, DTU Miljø Ph.d.-studerende Gry Janniche, DTU Miljø Lektor Mette Broholm, DTU Miljø	63 - 66

# KARAKTERISERING OG STIMULERING AF MORÆNELER/LERJORD

Seniorforsker, ph.d. Knud Erik Klint, GEUS  
Seniorforsker Bertel Nilsson, GEUS

## **ATV JORD OG GRUNDVAND**

Levering af reaktive stoffer i lavpermeable aflejringer.  
"It's a contact sport!"

Møde 16. juni 2011



## RESUMÉ

GEUS har i perioden 2004-2008 gennemført Projektet STRESOIL under EU's 6 rammeprogram /1/2/. Projektet havde som overordnet formål at teste fraktureringsmetoder og måle effekten af *in situ* oprensning af organisk forurening i den umættede del af opsprækket moræner. I 2008 indgik GEUS samarbejde om et nyt forskningsprojekt REMTEC finansieret af DSF og koordineret af DTU, hvor effekten af tre stimuleringsmetoder testes i forbindelse med oprensning af chlorerede opløsningsmidler fra mættet moræner. /3/ Sideløbende med stimulering og oprensningsforsøg er der udviklet simple metoder til karakterisering af moræner, herunder implementering af GISværktøjer for at kunne vurdere geologisk og hydraulisk variabilitet i områder dækket af moræner.

## BAGGRUND

Opsprækkede lavpermeable glaciale sedimenter dækker store dele det nordlige og centrale Europa og udgør et problem i relation til spredningen af forurenende stoffer gennem umættet zone til grundvandet gennem naturlige sprækker og makroporer. Forsøg på at rense organiske forureninger op fra disse opsprækkede sedimenter er forbundet med store udfordringer. Det er velkendt at de organiske forureningers strømning primært følger de naturlige vertikale sprække og makroporesystemer og derfor ikke særlig effektivt blive indfanget af filtre installeret i vertikale borer.

Forsøg med stimulering af lavpermeable bjergarter for at ændre på de bulkhydrauliske egenskaber og accelerere oprensnings metoder har således været i gang i flere år, både i Europa og især i USA og Canada. Metoderne strækker sig fra mere drastiske forsøg som blasting og mixing til mere skånsomme metoder som pneumatisk og hydraulisk frakturering. Dette foregår ved at lave horisontale sandfyldte sprækker der forbinder de eksisterende vertikale naturlige sprækkesystemer med hinanden og derved forøger virkningsgraden af oprensningsmetoderne væsentlig, og på den måde optimerer eksisterende *in situ* oprensningsteknologier af punktkildeforureninger. Fordelene er åbenlyse i forhold til traditionel bortgravning af forurenede jord idet især forureninger i byområder kan være vanskeligt tilgængelige og meget omkostningstunge at håndtere. De fleste "In situ" oprensningsteknologier har imidlertid vist sig at have en begrænset effekt i lavpermeable sedimenter især moræner der udgør mere end 40 % af Danmarks overflade areal. Der er derfor et åbenbart behov for udvikling af metoder til at effektivisere teknologierne.

## FORMÅL

Kravet i REMTEC-projektet var at skabe horisontale sprækker med en lille indbyrdes afstand, helst ned til 20 cm. Metoderne omfattede pneumatisk/hydraulisk frakturering og geo-probe-injection, der basalt set også er en hydraulisk frakturerings metode. Metoderne viste sig kun delvist effektive, idet især de dybtliggende frakturer var vanskelige at styre. Konklusionen var at den bedste effekt blev opnået med Geo-proben når det drejede sig om at kontrollere fordelingen af mange tætliggende sprækker. Det viste sig også at nogle af de hydrauliske sandfyldte sprækker opførte sig noget anderledes end de sprækker der blev installeret under STRESOIL projektet.

Da samme metoder blev benyttet under de to forsøg må årsagen søges i de forskellige geologiske/geotekniske forhold på de to forsøgslokaliteter. Det leder igen spørgsmålet hen på



hvilke typer lerjorde, der er velegnede til stimulering og hvilke typer hvor metoden er mindre effektiv.

Nærværende artikel har derfor tre formål

1. Præsenterer en systematisk metode til at klassificere moræner i forskellige typer på baggrund af texturelle, geologiske og geotekniske egenskaber.
2. Redegøre for hvordan de forskellige morænerstyper er fordelt i det danske istids-landskab.
3. At vurdere hvilke typer moræner der potentielt er mest velegnede til udførelse af kunstig frakturering.

## KLASSIFIKATION AF MORÆNER

Termen moræner benyttes bredt om lerede dårligt sorterede sedimenter, der er aflejret i et glacialt miljø. Der findes imidlertid mange forskellige glacial miljøer hvorunder moræner kan aflejres. For at kunne lave en yderligere opdeling i specielle aflejringstilstande og processer relateret til glacial aflejring processer benyttes her den engelske procesrelaterede term "till" i stedet for moræner.

Till er sedimenter direkte afsat fra en gletscher (iskontaktsediment), enten som en basal till under gletscheren som *deformation till*, *lodgement-till* eller "*subglacial melt-out-till*" (bundmoræne), eller oven på isen (supraglacialt), ved udsmelting og nedglidning fra selve isen som *meltout* eller *flow-till* (flydemoræne).

I forbindelse med analyse af forekomsten af naturlige sprækker i moræner skelner man ikke imellem de forskellige typer basale tills, men da deres interne deformationsmekanisme er afgørende for dannelse af naturlige sprækker, skelnes der derfor to overordnede typer basale tills: A-type der er deformeret blødt "ductile" og B-type der er deformeret sprødt "Brittle" (tabel 1). Forsøg med kunstig frakturering har vist at især forekomsten af naturlige sprækker har betydning for dannelse af kunstige sprækker. Derfor er det vigtigt at skelne imellem opsprækkede og massive tills.

Det er vigtigt for tolkningen af naturlige sprækkers oprindelse, at belyse om det undersøgte moræne er afsat foran eller under en gletscher, samt i hvilken retning gletscheren bevægede sig. De geologiske undersøgelser omfatter bjergartsbeskrivelse og kinetostratigrafiske undersøgelser/5/, der indbefatter beskrivelse af bjergarternes kornstørrelsesvariation, tekstur, sedimentære strukturer, farve, kalkindhold samt måling og beskrivelse af deformationer, skurestriber, fabrik m.m. Kombineret med geotekniske undersøgelser og geomorfologisk analyse kan aflejringstilstanden tolkes og den geologiske/geotekniske historie rekonstrueres.

I tabel 1 præsenteres en opdeling af moræner i till typer der er inddelt efter deres geologiske variabilitet og geotekniske egenskaber.

## FORDELING AF MORÆNERSTYPER I GLACIALE LANDSKABS-TYPER

Sammenhængen imellem till typer og geomorfologi er essentiel idet specielt sub-glaciale (belastede) landskabstyper har vist sig ofte at indeholde relativt systematisk opsprækket massivt moræner. Randglacial landskabstyper er ofte tektonisk forstyrrede og dermed stærkt heterogene, hvorimod supra-glacial landskabsformer som f.eks. dødislandskaber ofte er domineret af svagt konsoliderede flow tills der overlejrer underliggende landskabselementer som hedesletter, moræneflader eller randmoræner. I øjeblikket er det digitale geomorfo-

logiske kort over Danmark under udarbejdelse på GEUS. Ved hjælp af dette kort kan landskabet inddeles i områder præget af subglacial, rand-glacial eller proglaciale processer (tabel 2). De sub-glaciale deformationsmekanismer påvirker kun sedimenter under selve gletscheren, og relaterede sprækker er derfor kun til stede i sedimenter af samme eller ældre alder end isfremstødet. Sprækker, der overpræger eller genanvender ældre sprækker i f.eks. en lodgement till, kan derfor antages at være yngre og af "ikke glacial oprindelse" d.v.s. fryse/tø, udtørring eller neo-tektisk oprindelse. Dette understreger betydningen af at kende et sediments alder og dannelseshistorie når man skal klassificere moræner. Det har også vist sig at ikke kun den geomorfologiske ramme, men også de underliggende lag synes at have indflydelse på de geotekniske forhold og dermed fordelingen af naturlige sprækker i moræner.

### Det polymorfologiske koncept

I et forsøg på at kombinere og sammenligne nogle af ovenstående parametre er der blevet udarbejdet en ny type tematisk kort med det formål at vurdere graden af opsprækning/geologisk heterogenitet i områder dækket af ler. Kortet benævnes *Det Polymorfologiske Kort* og tager udgangspunkt i det geomorfologiske kort, men en tolkning af underliggende landskabsformer er indarbejdet i kortet (fig. 1), der dermed kan sammenlignes med bl.a. ler tykkelse og dybde til redox grænse for at udpege områder med potentielt ensartet grad af heterogenitet og opsprækning.

Kortet kombinerer i hele eller dele af sit dækningsområde

1. geologisk information fra JUPITER-databasen, kystkliner og grusgrave,
2. sand/ler tykkelse under øverste moræner (GIS-søgninger),
3. det geologiske kort (jordartsskortet)
4. det digitale geomorfologiske kort
5. den nye detaljerede højdemodel,
6. Prækvartæroverfladens topografi og geologi, samt
7. ekspertviden indhentet fra den systematiske kortlægning, råstofundersøgelser, geofysik og diverse udgravninger til kortlægning af sprække- og makropore fordelingen.

Kortet benævnes "det polymorfologiske kort" fordi det i modsætning til et traditionelt geomorfologisk kort også inddrager underliggende landskabsformer (Figur 1).

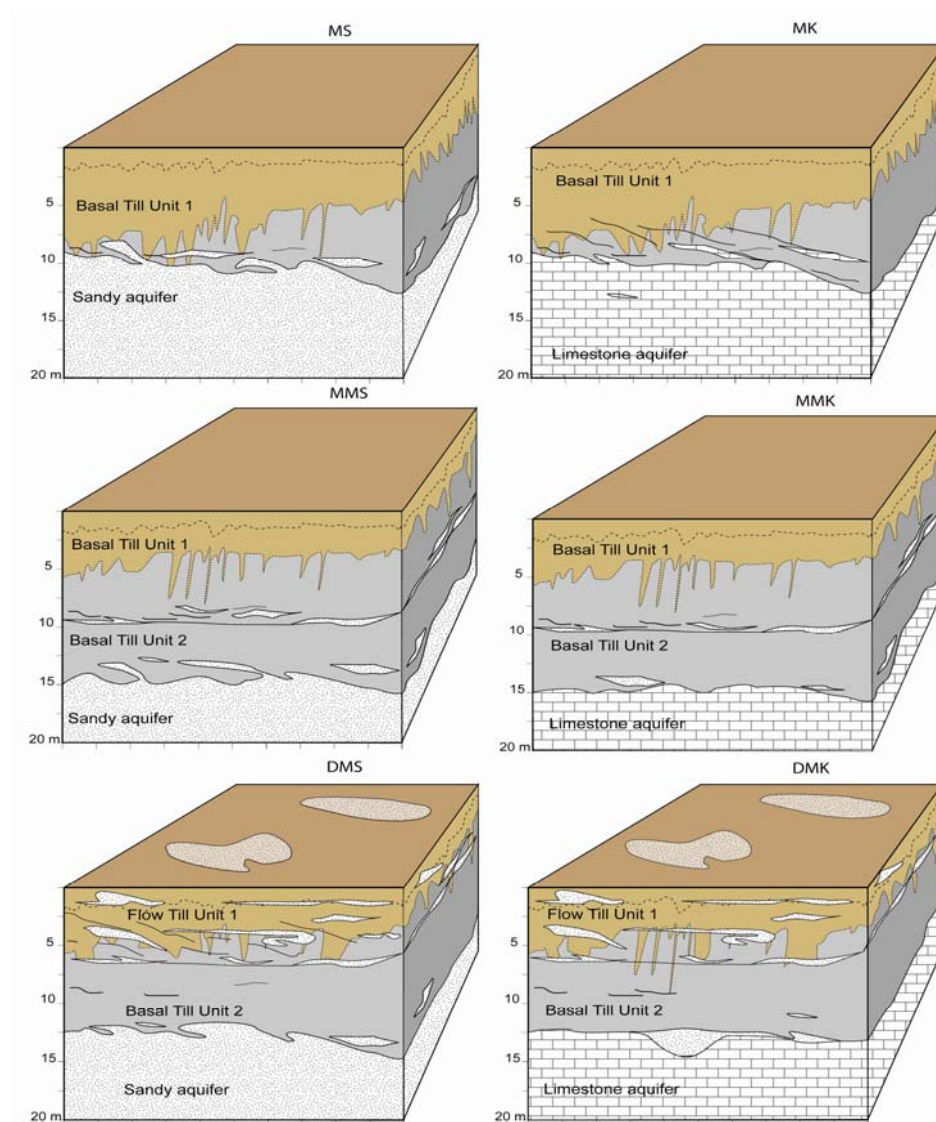
De primære polymorfologiske landskabsformer (domineret af ler) er moræneflader og dødislandskaber samt randmoræner. De kan kombineres på mange måder og opdeles yderligere i forskellige polymorfologiske landskabskonfigurationer herefter benævnt PM-typer, hvoraf de mest almindelige er:

1. Moræneflade over dødislandskab MD,
2. Moræneflade over randmoræne MR,
3. Moræneflade over smeltevandsslette MS,
4. Moræneflade over kalkoverflade MK,
5. Moræneflade over issøler eller moræner ML/M,
6. Dødislandskab over moræneflade DM,
7. Dødislandskab over randmoræne DR,
8. Dødislandskab over morænelandskab over smeltevandsslette DMS,
9. Dødislandskab over morænelandskab over randmoræne DMR, og
10. Ikke overskredne randmoræner R.

Det antages, at de forskellige polymorfologiske typer også har karakteristiske hydrauliske egenskaber, som i praksis dikteres af de underliggende sedimenters skønnede dræningsevner.

### WEB baseret site karakteriserings værktøj

Et simpelt web baseret till klassifikationssystem er under udarbejdelse. Det fungerer som et "multiple choice" værktøj hvor forskellige egenskaber kan vælges og hvor output gerne skulle være en konceptuel geologisk model figur 1.



Figur 1 Konceptuelle geologiske modeller repræsenterende forskellige PM-konfigurationer.

**Step 1: Till Klassification af de enkelte enheder.** (baseret på GIS-data, feltopmålinger, boredata.

Input data er: Klast fabrik, skurestriber, deformationsstrukturer, tekstur, konsolidering, geomorfologisk ramme.

Out-put : *till type*

Step 2a: **Vurdering af sprækkefordeling i hver enkelt enhed.** (baseret på boredata)

Input data er: Till type (fra step 1), till/ler tykkelse, dybde til redoxgrænse, sediment/bjergartstype i første lag under till, Dybde til grundvandsspejl (primært og sekundært). Referer til "best fit PM-geologisk model se figur 1"

Output: *Potentiel sprækkefordeling i enkelt till enhed*

Step 2b: **Vurdering af sandlinsefordeling i hver enkelt enhed** (baseret på bore data)

Input data er: till type fra step1, sandlinsefrekvens. kumulativ tykkelse af sandlinser.

Step 3: Hydraulisk karakterisering baseret sprække fordeling og sandlinsefordeling.

Step 4: Kalibrering af model baseret på hydrauliske test og evt. fund af forurening m.m.

Step 5: Evaluering af data, definering af yderligere vidensbehov, anbefalinger til yderligere undersøgelser (flere borer, evt. udgravning, hydrauliske test m.m.), herefter gentagelse af step 1-4 indtil optimal model er opnået.

Step 6 Formulering af stimulering og oprensings strategi.

## **HVILKE TILL TYPER ER VELEGNEDE TIL STIMULERING?**

Forsøgene med hydraulisk frakturering og injektion af sandfyldte sprækker i Polen under STRESOIL projektet viste at ud af de 21 sprækker der blev installeret i tre forskellige till typer var der 5 sprækker der mislykkedes. Dette skyldtes til dels menneskeskabte årsager såsom gamle borer. Men i 4 tilfælde skød sprækkerne direkte til overfladen i stedet for at lave en horisontal "pandekage" som det var planen. Den geologiske lagfølge i Polen bestod af en basal till type-A (blød uden sprækker) overlejrende smeltevandssand. Over den kom dernæst en basal till type B (velkonsolideret opsprækket), dernæst en dårlig konsolideret flow till og øverst en dårlig konsolideret drop till (sø-aflejring). De hydrauliske sprækker i den nedre bløde type A basale till dannede ikke særlig gode sprækker, hvorimod de hydrauliske sprækker i den hårde opsprækkede type B basale till var flot udviklede. En karakteristisk egenskab var at de hydrauliske sprækker fulgte de eksisterende sub-horisontale sprækker, hvorimod de hydrauliske sprækker i de øvre bløde flow og drop till synes at være styret af fysiske love mere end geologien. Her var både sandlinser og andre inhomogeniteter gennemsat af sprækkerne der ikke synes påvirket af de strukturelle forhold.

Ved sprækkforsøgene i Vadsby blev der injekteret i alt 6 hydrauliske sandsprækker og et noget større antal hydrauliske sprækker i geo-probe borerne. Her var de hydrauliske sprækker i den øvre opsprækkede basale till type B generelt pænt udviklet ligesom i Polen. De hydrauliske sprækker der lå i den bløde type A basale till under den hårde till blev derimod dårligere udviklet og en enkelt sprække skød op til overfladen.

Årsagen til at nogle sprækker vælger at skyde direkte op til overfladen i stedet for at danne subhorisontale sprækker skal måske søges i flere forskellige forklaringer.

1. Dybden har tilsyneladende betydning for sprækkeformen idet især dybtliggende hydrauliske sprækker synes at skyde oftere opad end, Den kritiske dybde synes at ligge under 5-6 meter i moræner.

2. Bløde type A basal tills er måske ikke lige så velegnede til frakturering som velkonsoliderede tills.
3. Endelig kan konfigurationen af flere lag med velkonsoliderede og dårligt konsoliderede egenskaber måske også have en betydning. Det virker umiddelbart som om konfigurationen med et velkonsolideret øvre lag og et dårligt konsolideret (blødt) nedre lag vanskeliggør dannelsen af veldefinerede pandkageformede hydrauliske sprækker i den bløde moræneler.

## KONKLUSION

Der er mange udfordringer i forbindelse med stimulering af moræneler. Generelt må det konkluderes at især dybden og de geotekniske egenskaber synes at være afgørende for om det er muligt at skabe velegnede sub-horisontale sprækker.

En ny metode til opdeling af glaciale landskaber i mindre områder med ensartet geologisk variabilitet er under udvikling og kombineret med simple webbaserede klassifikationsmetoder for moræneler vil metoden kunne udgøre et vigtigt skridt i retning mod en ny forbedret systematisk metode til geologisk karakterisering af punktkildeforureninger såvel som fladekilde forureninger.

## REFERENCER

/1/ Klint, K.E., Kasela, T., Nilsson, B. & Haessler, F. 2005: Site description, geological settings and core oil sampling at the Kluczewo Airport, Poland. Deliverable report of D2 and D3 to EU in relation to Contract no. SSPI-CT-2003-004017. STRESOIL. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport **2005/74**, 24 pp.

/2/ Nilsson, B., Brøker, T., Slack, B., Kasela, T. & Klint, K.E. 2006: Installation of on-site stimulation set-ups within the Central Refuelling Station at the Kluczewo Airfield, Poland. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport **2006/52**, 65 pp.

/3/ Christiansen, C.M., Damgaard, I., Broholm, M.M., Kessler, T., Klint, K.E., Nilsson, B. & Bjerg, P.L. 2010: Comparison of Delivery Methods for Enhanced In Situ Remediation in Clay Till. Ground Water Monitoring & Remediation, vol. 30 pp 107-122.

/4/ Berthelsen, A., 1978. The methodology of kineto-stratigraphy as applied to glacial geology. Bulletin of the Geological Society of Denmark, 27, Special Issue, 25–38.

Dette Projekt er en del af REMTEC-projektet finansieret af DSF

<b>Classification of Fine-grained Diamict Deposits</b>		
<b>Till type</b>	<b>Deposition process</b>	<b>Special characteristics</b>
Basal till  Type-A Type-B	Basal tills are formed as a result of two processes: by plastering and deformation of glacial debris from the sliding base of a moving glacier (lodgement process), and as a result of incorporation into the till of the substratum under the sliding base of a moving glacier (pure deformation). Most basal tills are formed by a combination of these two processes. They may be separated by the mode of deformation as: A-type (ductile) and B-type (brittle) basal tills.	Generally massive, ice scoured stoss-lee side blocks. Boulder pavements. Consist of exotic material mixed with locally derived sediment. A-type (ductile deformation). Generally low to medium strength till, massive matrix with occasional water-escape structures and intrusion of hydro-fractures into the subsurface. Medium/strong fabric. Often drag folding or slump structures along base. (Poorly drained till) B-type (brittle deformation): High strength till, massive matrix, generally strong clast fabric. Often low dipping fissile shear zones, systematic fractured or faulted. (well-drained till)
Glacitectonite	A glacitectonite is a glacial breccia formed as a result of basal squeezing and crushing of the substratum by a moving glacier.	Medium-high strength, highly deformed (brecciated) transition towards underlying substratum primarily consisting of the still recognisable basement material mixed with till.
Sub glacial melt-out till	Melt-out till is deposited by a slow release of glacial debris from the sole of a stagnant glacier by sub glacial melting.	Low strength. Very strong clast fabric, layers draped over clasts. Clasts are less rounded than in the lodgement till. Often embedded rafts of substratum. Occasional isoclinal folds of sandy/silty bands.
Supra glacial Flow till	Flow-tills derived from any glacial material that is released from glacier ice or from freshly deposited till and which is redeposited by gravitational processes.	Low strength. Varied clast fabric, sometimes layered with inclusions of glaciofluvial sediments. Random orientation of fold-axes fractures and faults. Sometimes stacked sequences of debris-flows.
Supra glacial melt-out till	Derived from any glacial material that is slowly released from glacier-ice without being redeposited	Low strength. Sorted and unsorted sediments. Small basins with primary sedimentary structures, sometimes with small-scale faulting from collapse after melting of buried ice.
Waterlain diamicts (drop-till)	Glaciers and icebergs floating in lakes or oceans will release drop material to the sea or lake-floor sediments, and sometimes deform them directly by grounding. Occasional turbidites occur.	Glaciolacustrine, usually clay-rich, thick, sometimes laminated matrix mixed with drop material. Random fabric, occasional randomly deformed sand bodies/lenses. Glacio-marine: as above but with marine fauna, foraminifer, shells etc.

Tabel 1. Klassifikation af moræneler og de enkelte tills fysiske egenskaber (klint 2001).



# METODER TIL LEVERING AF REAKTIVE STOFFER I LAVPERMEABLE AFLEJRINGER

Civilingeniør, ph.d. Camilla Maymann Christensen, Region Sjælland

## **ATV JORD OG GRUNDVAND**

Levering af reaktive stoffer i lavpermeable aflejringer.  
"It's a contact sport!"

Møde 16. juni 2011





## INDLEDNING/BAGGRUND

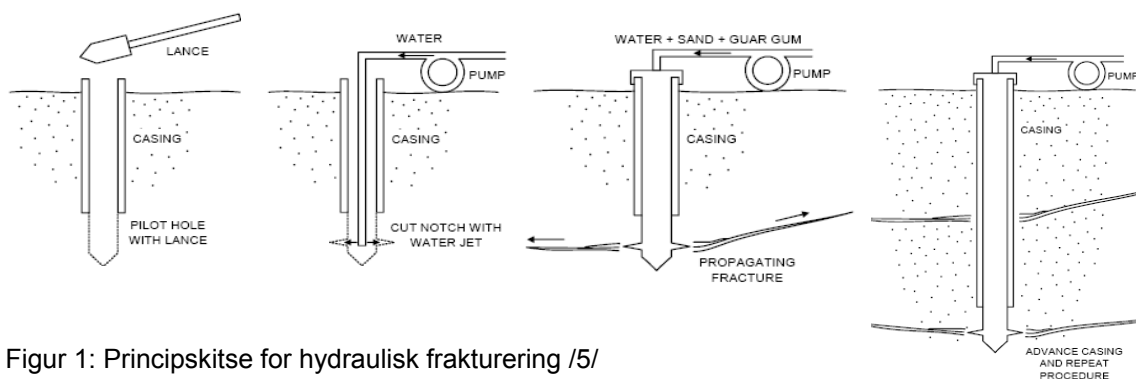
Hvis *in situ* oprensning af forurenede jorde skal lykkes, skal der skabes tilstrækkelig kontakt mellem de reaktive stoffer, som tilsættes, og den tilstedeværende forurening. I lavpermeable medier, såsom moræneler, hvor forurening ofte er svært tilgængelig, kan øget kontakt skabes ved hjælp af en række metoder, udviklet til forbedret tilførsel og spredning af reaktive stoffer. Disse metoder omfatter frakturering, direkte sonde tilførsel, soil mixing, elektrokinetik, m.v. Metoderne har været kendt og anvendt i en årrække, især i USA, men videreudvikles fortsat, bl.a. fordi der endnu ikke er genereret direkte dokumentation for, at de kan tilvejebringe *tilstrækkelig* kontakt mellem reaktive stoffer og forurening til at imødekomme strenge oprensningskrav. Denne artikel skitserer kort de enkelte metoders principper, udviklingstrin og bedste resultater til dato. Til slut sammenfattes artiklens tekst i en metodeoversigt.

## FRAKTURERING

Frakturering kendes traditionelt set fra vandindvinding og især olieindustri /1/. I 1990'erne begyndte teknologien for alvor at blive anvendt ved forureningsoprensninger i lavpermeable jorde i USA /2/, først for at tilvejebringe øgede oppumpningsrater ved pump-and-treat og flerfase-ekstraktion, siden for at forbedre tilførsel af reaktive stoffer /3/. Tre former for frakturering anvendes i dag i dette regi: pneumatisk frakturering, hydraulisk frakturering og sprængningsfrakturering. Sprængningsfrakturering anvendes kun i grundfjeld og omtales ikke nærmere her.

### Hydraulisk frakturering

Ved hydraulisk frakturering etableres først en foret boring til den dybde, som man ønsker at frakturere, dvs. danne en sprække ved. Når boringen er fuldført, trækkes foringen et stykke tilbage for at blotte sedimentet i fraktureringsdybden. Dernæst skæres som regel en kile i sedimentet med en kraftig vand-dyse for at spore den efterfølgende frakturering. Selve fraktureringen sker under nedpumpning af en vandig opløsning af sand, guar-gel og Borax under tryk (~ 2-5 bar i moræneler /4/). Denne blanding er sammensat for at opnå en permanent sandfyldt sprække. Sandet opblandes i guar-gel for at sikre homogen udbredelse ved fraktureringen, hvorefter gelen nedbrydes af Borax i løbet af nogle timer og efterlader den ønskede sandfyldte sprække. Typisk vil sprækken have en tykkelse på 1-2 cm og en radius på 2-4 m /5/. Efterfølgende kan reaktive stoffer tilføres. En principskitse er vist i figur 1. Billeder fra hydraulisk frakturering udført i Danmark i 2008 er vist i figur 2. Metodens største fordel er dannelsen af permanente sprækker, som også kan anvendes til re-injektion af reaktanter.



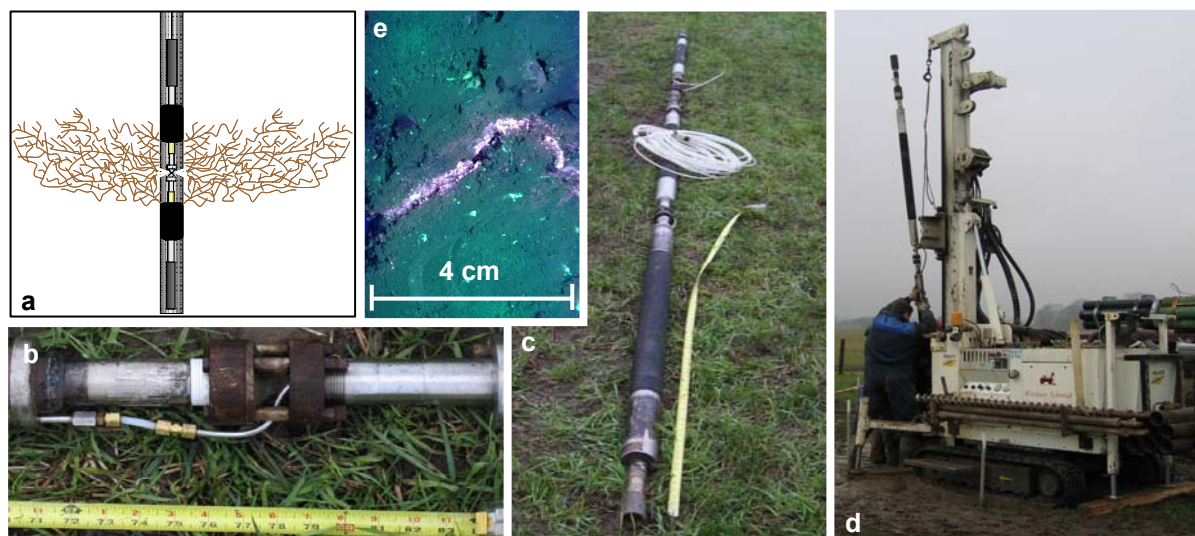
Figur 1: Principskitse for hydraulisk frakturering /5/



Figur 2: Hydraulisk frakturering i billeder – taget ved pilotprojekt på Vadsbyvej, Hedehusene (beskrevet i /4/ og /6/). (a) Udstyr og mandskab. (b) Guar-gel-blanding. (c) Tragt hvorfra sand-guar-blanding pumpes ned i boring. (d) Udgravet sprække dannet ved hydraulisk frakturering 3 m u.t. (gult sand – omkransende blå farve er farvestof injiceret i sprækken efterfølgende for at vurdere spredning).

### Pneumatisk frakturering

Ved pneumatisk frakturering etableres ligeledes en boring, dog ikke nødvendigvis foret, til den ønskede fraktureringsdybde. Herefter nedsænkes en gas-dyse omkranset af oppustelige pakkere til den ønskede dybde og pakkerne pustes op således at fraktureringsdybden isoleres. Ved tilførsel af gas under tryk ( $\sim 2-9$  bar i moræneler /4/ og /7/) samt en vandig opløsning af reaktivt stof, atomiseres væsken af gas-dysen og føres med gassen ud i sedimentet, som opsprækkes. Metodens største postulerede fordel er dannelsen af tætte netværk af små sprækker /8/ (i størrelsesordenen 1-2 mm tykke med radius 2-4 m), som øger kontaktfladen mellem reaktanter og forurenet sediment betragteligt /7/. Denne egenskab er dog ikke dokumenteret /4, 7/.



Figur 3: (a) Principsskitse for pneumatisk frakturering samt (b-d) billeder fra pneumatisk frakturering – taget ved pilotprojekt på Vadsbyvej, Hedehusene (beskrevet i /4/ og /7/). (b) gas-dyse. (c) Dyse og pakkersystem. (d) Pakkersystem nedsænkes i boring. (e) Dannet sprække.

Både hydraulisk og pneumatisk frakturering har været anvendt kommercielt i USA gennem de sidste 20 år og er anerkendte hjælpemetoder ved *in situ* oprensninger. Generelt har afstanden mellem udførte sprækker været stor og der er sjældent angivet overvejelser omkring geologiske og geotekniske faktoreres forventelige indflydelse på sprækkernes udbredelsesformer og –retninger /4/. Indirekte dokumenterede resultater (fx vandprøvetagning) af fraktureringsstøttede oprensninger viser ofte umiddelbare oprensningsforbedringer efterfulgt af tilbageslag af høje forureningskoncentrationer /4/.

Et omfattende dokumentationsstudie af pneumatisk og hydraulisk frakturering ved dybder fra 3-10 m u.t. er foretaget på Vadsbyvej i Hedehusene i 2005-2008 /4, 6, 7, 9/, og resultaterne herfra indikerer, at metoderne ikke er tilstrækkeligt udviklede til at kunne understøtte *in situ* forureningsoprensninger med strenge oprensningskrav og relativt korte tidshorisonter /4, 6/.

### Hybrid-frakturering, power injektion og frysefrakturering

Udover de omtalte velkendte fraktureringsformer, er der flere nye under udvikling. I USA er ARS Technologies Inc. ved at patentere hybrid-frakturering, som kobler de bedste egenskaber fra hydraulisk frakturering (mulighed for tilførsel af større mængder reaktivt stof) og pneumatisk frakturering (dannelse af tætte netværk af sprækker). Metoden afprøves på nuværende tidspunkt i felten i USA.

Også i USA er en ny form for hydraulisk frakturering – omtalt som power injektion – under udvikling. Ved fraktureringen anvendes meget høje tryk og opnåede feltresultater ser lovende ud. Metoden forventes afprøvet i pilotskala i Region Hovedstaden (med flere amerikanske samarbejdspartnere) i løbet af 2011.

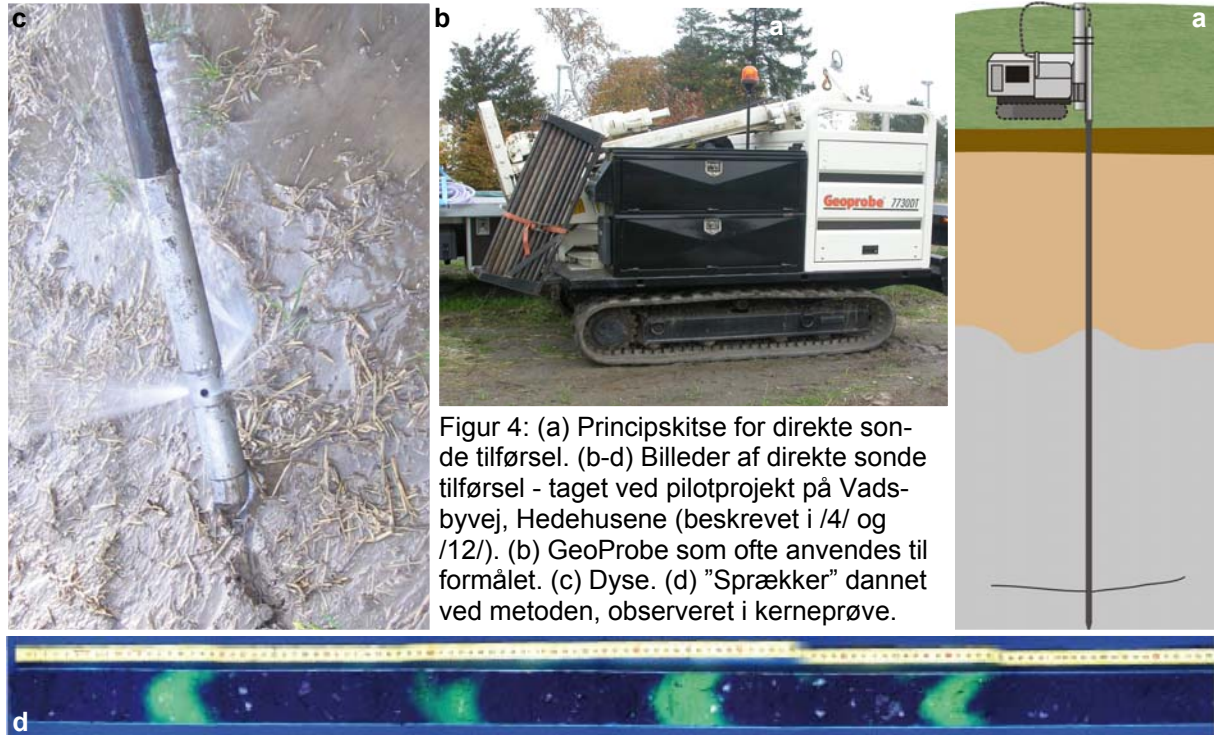
Derudover er der en ny fraktureringsform under udvikling i Danmark: frysefrakturering. Her vil man forsøge at efterligne naturens naturlige fryse-tø-processer, som skaber et meget tæt netværk af små sprækker i den terrænnære jord. Udviklingsprojektet er endnu på laboratorieskala og er et samarbejde mellem Region Hovedstaden og GEUS. Projektet vil forventeligt afføde resultater fra laboratorieforsøg med intaktkerner i løbet af 2011.

### Direkte sonde tilførsel

Direkte sonde tilførsel ("direct-push delivery", ofte omtalt som GeoProbe injektion) er, ligesom pneumatisk og hydraulisk frakturering, en udbredt hjælpemethode til forbedret tilførsel og spredning af reaktive stoffer ved *in situ* forureningsoprensninger, dog typisk i højpermeable aflejringer /10/. Metodens brug i lavpermeable aflejringer er således relativt ny og dokumentation såvel som retningslinjer er sparsomme /11/.

Væsker kan ved denne metode tilføres til jorden direkte gennem en dyse (på fx en GeoProbe), som nedføres til den ønskede tilførselsdybde ved brug af direct-push. I den ønskede dybde sprøjtes væsken ud under højt tryk (~5-10 bar i moræneler /4, 6, 12/). I Danmark har erfaringerne fra flere igangværende fuldskala applikationer til forbedring af stimuleret reduktiv dechlorering i moræneler i Region Hovedstaden (Gl. Kongevej + Vesterbrogade) samt omfattende dokumentationsstudier (Vadsbyvej) – ligeledes i moræneler /4, 6, 12/ – vist at metoden formår at skabe tætliggende sprækker (tykkelse ~2 mm) med overvejende vandret udbredelse (radius ~1 m), dvs. potentiale for væsentligt forbedret kontakt mellem reaktive stoffer og forurening. Et andet igangværende pilotprojekt med metoden i Region Hovedstaden (Bal-

dersbækvej) har dog samtidigt vist, at der skal arbejdes videre med optimering af diverse parametre, såsom dosering og tilførselstæthed, for at undgå overmætning følgende opskydning af væsker ved terræn.



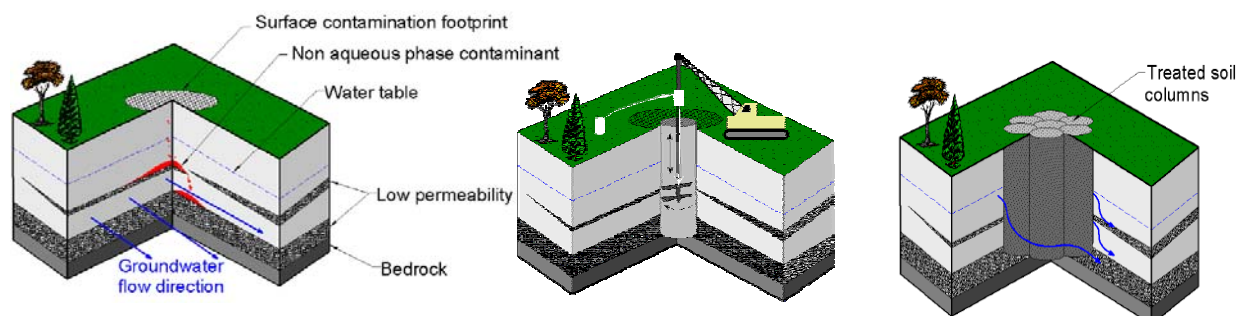
Figur 4: (a) Principskitse for direkte sonde tilførsel. (b-d) Billeder af direkte sonde tilførsel - taget ved pilotprojekt på Vadsbyvej, Hedehusene (beskrevet i /4/ og /12/). (b) GeoProbe som ofte anvendes til formålet. (c) Dyse. (d) "Sprækker" dannet ved metoden, observeret i kerneprøve.

### Soil mixing

Ved soil mixing foretages der en mekanisk *in situ* opblanding af jorden og tilsatte reaktive stoffer. Målet er at opnå en mere homogen spredning af reaktanter i hele jordmatricen og deraf en mere effektiv nedbrydning af forureningen heri. Der anvendes specielt udviklede bore- og mixerhoveder på en roterende borestamme, der føres ned i jorden og således blander jorden nedefter. Mixerhovedernes udformning er væsentligt differentieret efter anvendelsesmedie (fx sand og ler) og -dybde. Vand, bentonit og reaktive stoffer tilføres kontinuerligt under opblandingen via borestammen. /13/ Bentonit tilføres bl.a. for at mindske grundvandstrømning gennem det opblandede område.

Metoden er i brug kommercielt i USA og er afprøvet i fuld skala i Region Hovedstaden (Skuldelev). Resultater indikerer at metoden er yderst effektiv, men stadig forbundet med en række udfordringer, fx effektiv neddeling af ler, optimal dosering af reaktanter og slurry-mængder, og især dræning og stabilisering af jorden, så det kan lade sig gøre at anvende og færdes i oprensingsområderne relativt kort tid efter udført oprensning /13/.





Figur 5: Principskitse af soil mixing. Roterende mixer presses ned i jorden og opblander løbende jord, vand, bentonit og reaktive stoffer /14/.



Figur 6: Soil mixing i billeder – taget ved forsøgslokalitet i Region Hovedstaden. (v) Mixerhoved roteres ned i jorden. (m) Bassin udgravet ved terræn for at begrænse slurry-overløb ved overfladen. (h) Relativt homogen blanding af jord, vand og bentonit opnået ved soil mixing.

### Elektrokinetik

Elektrokinetik forsøges anvendt ved *in situ* oprensninger i lavpermeable medier i et forsøg på at eliminere problemet med reaktive stoffers foretrukne spredning i højpermeable indslag i den lavpermeable matrix ved hydraulisk tilførsel /15/. Dvs. en mere ensartet spredning reaktive stoffer forsøges tilvejebragt via bl.a. elektroosmose og -forese. I Danmark pågår et udviklingsprojekt mellem Region Hovedstaden og flere amerikanske samarbejdspartnere, hvor principperne anvendes til at øge transporthastigheden af bakterier og substrater anvendt ved stimuleret reduktiv dechlorering i moræneler. Indledende resultater fra laboratorieforsøg ser lovende ud og metoden forventes afprøvet i pilotskala inden længe.

## Oversigt

Metode	Ultrakort beskrivelse	Udviklingsstadie
Hydraulisk frakturering	Etablering af foret boring efterfulgt af kileskæring og nedpumpning af sand-guar blanding under højt tryk. Danner større sandfyldt sprække, som efterfølgende kan bruges til injektion og re-injektion af reaktive stoffer.	Kendte, kommercielt anvendte metoder i USA. Dansk dokumentationsstudie viser væsentlige begrænsninger i typisk dansk moræneler ved dybder > 5 m u.t.
Pneumatisk frakturering	Etablering af boring efterfulgt af sprækedannelse i given dybde via dyse ved gastilførsel under højt tryk. Dysen atomiserer simultant reaktanter fra væskeform til gasform. Det postuleres at denne fraktureringsform skaber tætte netværk af sprækker.	
Hybrid-frakturering	Kobling af pneumatisk tæt sprækkenetværksdannelse med muligheden for øget hydraulisk masse tilførsel.	Metode under udvikling og patentering i USA (ARS Technologies Inc.).
Power injektion	Hydraulisk frakturering ved meget høje tryk.	Metoden er afprøvet i USA med gode feltresultater og pilotprojekt forventes udført i Region Hovedstaden i år.
Frysefrakturering	Efterligning af naturens fryse-tø-processer til dannelse af tætte netværk af små sprækker.	Metode under udvikling i Danmark (Region Hovedstaden & GEUS)
Direkte sonde tilførsel	Direkte tilførsel af væske til jorden via sonde med dyse under højt tryk.	Kendt og veletableret metode i høj-permeable aflejringer. Dokumentation og retningslinjer for brug i lav-permeable medier er sparsomme. Resultater fra brug ved danske fuldskalaprojekter og dokumentationsstudier i moræneler viser stort potentiale, men behov for videreudvikling af dosering af reaktanter, osv.
Soil mixing	Opblanding af jord og reaktive stoffer (og bentonit) via mixerhoved på roterende borestamme.	Metode i kommerciel brug i USA. Under udvikling i Danmark (Region Hovedstaden, NIRAS & Arkil). Resultater fra Danmark og USA indikerer at metoden er yderst effektiv, men stadig forbundet med en række udfordringer.
Elektrokinetik	Udnyttelse af elektroosmose og –forese til at skabe mere ensartet og hurtigere spredning af reaktive stoffer.	Under udvikling i Danmark/USA (Region Hovedstaden & amerikanske samarbejdspartnere) til brug ved SRD.

## KONKLUSION & PERSPEKTIVERING

Metodeoversigten ovenfor viser, at der forefindes en række metoder, som til en vis grad kan støtte *in situ* oprensninger i lavpermeable aflejringer ved forbedret tilførsel af reaktive stoffer. Nye metoder er under udvikling og velkendte metoder er under videreudvikling for at imødekomme erkendelsen af, at tilstrækkelig kontakt mellem reaktive stoffer og forurening i disse medier er altafgørende for effektiv oprensning.

## LITTERATUR

- /1/ Environmental Fracturing of Soils in Horizontal and Vertical Boreholes for Enhanced Site Remediation, Bures, G., 1998, FracRite.
- /2/ Alternative Methods for Fluid Delivery and Recovery. Murdoch, L.C., Wilson, D., 1994, USEPA.
- /3/ Technology Status Report – Hydraulic, Pneumatic and Blast-Enhanced Fracturing. Roote, S., 2000, GWRTAC.
- /4/ Methods for Enhanced Delivery of In Situ Remediation Amendments in Contaminated Clay Till, Christiansen, C.M., 2010, DTU Environment.
- /5/ Innovative Technology Summary Report: Hydraulic and Pneumatic Fracturing, 1998, USDOE.
- /6/ Comparison of Delivery Methods for Enhanced In Situ Remediation in Clay Till, Christiansen, C.M., 2010, Ground Water Monitoring & Remediation.
- /7/ Characterization and Quantification of Pneumatic Fracturing Effects at a Clay Till Site, Christiansen, C.M. et al., 2008, Environmental Science & Technology.
- /8/ ARS Technologies Inc.: [www.arstechnologies.com](http://www.arstechnologies.com), accessed 2011.
- /9/ Pneumatisk frakturering – Dokumentation af pilotforsøg, Vadsbyvej 16A, Hedehusene, 2006, Københavns Amt.
- /10/ PRB Installation Using Direct-Push Techniques to Guide Placement, 2008, Nelson, D. et al., Proceedings of the Sixth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Battelle Press.
- /11/ The Realities of Direct Push Injection into Difficult Lithologies, 2008, Cooper, E. et al., Proceedings of the Sixth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Battelle Press.
- /12/ Direct-Push Delivery of Dye Tracers for Direct Documentation of Solute Distribution in Clay Till, 2011, Christiansen, C.M. et al., Journal of Environmental Engineering.
- /13/ Soil mixing og *in situ* nedbrydning, 2010, Toft, A., VJ Info.
- /14/ Treatment of Chlorinated Solvent Source Zones by Admixing ZVI and Clay, 2010, Sale, T. and Olson, M., Proceedings of the Seventh International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Battelle Press.
- /15/ Combining Electrokinetics and Oxidation for Remediation of Heterogeneous and Low Permeability Media, Reynolds, 2010, D. et al., Proceedings of the Seventh International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Battelle Press.





# DESIGN REQUIREMENTS FOR ERD AND ISCO: HOW CLOSE AND HOW FAST TO ACHIEVE AN EFFECTIVE REMEDIATION?

PhD student Julie Chambon<sup>1</sup>  
PhD Gitte Lemming<sup>1</sup>  
Research Assistant Gabriele Manoli<sup>1</sup>  
Associate Professor Mette Broholm<sup>1</sup>  
MSc in Engineering, PhD Mette Christophersen<sup>2</sup>  
Professor Philip J. Binning<sup>1</sup>  
Professor Poul L. Bjerg<sup>1</sup>

<sup>1</sup>DTU Environment,  
<sup>2</sup>Region Syddanmark

## **ATV JORD OG GRUNDVAND**

Levering af reaktive stoffer i lavpermeable aflejringer.  
"It's a contact sport!"

Møde 16. juni 2011



## ABSTRACT

Clayey tills contaminated with chlorinated solvents are a threat to groundwater and are difficult to remediate. Full scale Enhanced Reductive Dechlorination (ERD) and In-Situ Chemical Oxidation (ISCO) are promising remediation technologies for such sites, but the delivery of reactants is challenging due to mass transfer limitations in such low-permeability media. A numerical model is used to investigate the influence of three controlling parameters (injection intervals, thickness of active zones and reaction kinetics) on the expected mass removal in order to assess timeframes for remediation.

## BACKGROUND

Chlorinated solvents are a wide spread subsurface contaminant and a significant threat to groundwater quality. Many contaminated sites in Denmark occur in areas with fractured clay geology at the land surface /1/, where contaminants slowly diffuse into the clay matrix and rapidly migrate through the fracture network /2/. Even after the removal of the physical source from the site, the contaminant can back diffuse to the fracture network for hundreds of years, causing long-term contamination of an underlying aquifer /3-5/. The remediation of contaminated clayey till sites is very challenging, because of the complexity of the source and the transport processes, and the mass transfer limitations due to slow diffusion processes in the low permeability clay matrix /6/.

Several in-situ remediation technologies have been considered for such sites, including Enhanced Reductive Dechlorination (ERD), where an electron donor and/or specific degraders (*Dehalococcoides*) are injected in the subsurface to enhance the sequential degradation of TCE to the non-toxic compound ethene, and In-Situ Chemical Oxidation (ISCO), where a strong oxidant (for example permanganate) is injected in the subsurface to transform chlorinated solvents into harmless compounds. Pilot and full-scale applications of these technologies at several sites in Denmark have shown that the main challenge is to get contact between the reactant (bacteria or oxidant) and the contaminant trapped in the low-permeability media /7-9/. Sampling of intact cores from the low-permeability matrix has shown that the active zones (where degradation of the contaminant occurs) are limited in the matrix, due to the slow diffusion transport processes, and this affects the timeframes for the remediation (e.g. ISCO at Dalumvej /10/, ERD at Rugårdsvej /11/, Gl. Kongevej and Sortebrovej /12/). Previous modeling studies /13,14/ have shown that the remediation efficiency is affected by three main parameters for a given site, the injection interval (how close?), the development of active degradation zones in the matrix, and the reaction kinetics (how fast?).

## OBJECTIVES

The aim of this study is to use numerical modeling tool to assess the effects of the injection interval, development of active zones and reaction kinetics on the remediation efficiency for ERD and ISCO.

## METHODS

### Site description

The modeling tool is applied to Sortebrovej, a contaminated site located in Tommerup, Denmark. The geological setting is characterized by two fractured clay layers (clay till unit 1 and unit 2) divided by a sandy layer (see Figure 1). The regional groundwater flows towards the

North-East in the regional aquifer located around 40m below ground surface /15/. The site was investigated in 2001-2004 by Fyns Amt and extensive soil and groundwater contamination by chlorinated ethenes (mostly TCE, sporadic cis-DCE) was reported /16,17/. Most of the contamination is located in clay till 1 between 13 and 20 mbs over an area of 750 m<sup>2</sup>. The contaminant is slowly leaching out of the clay into the sandy layer where concentrations up to 350 µg/l have been measured, and with further infiltration of contaminants occurring down to the regional aquifer. Remediation based on ERD was started in 2006, but ISCO was also considered for the site. The treatment zone considered in the model is shown in Figure 1. The treatment zone is limited to the clay till, in order to investigate the influence of the three parameters on remediation efficiency in low-permeability media. Figure 1 also shows a concentration profile of TCE for a transect through the source zone based on monitoring results from 2005-2006 before the remediation was initiated. The contaminant mass in the source is estimated to 23 kg TCE and 3 kg DCE based on the source zone concentrations.

### **Model description**

The numerical model is applied to a cross section of the contaminated area. As the contamination is mainly located in the clay till unit 1, the layers above this are not included in the model. The groundwater flow in the system is modeled under steady-state conditions. Fracture geometry (for the two clay tills) and hydraulic parameters (porosity, hydraulic conductivity, etc...) are based on observation at the site /16/. In order to investigate the direct effect of the remedial actions, the contaminant mass has been limited to include only the contamination which resides within the modeled treatment zone (22 kg).

Sequential degradation of TCE to ethene in ERD remediation is modeled using Monod kinetics for the case where the electron donor is non-rate limiting, and the kinetic parameters are obtained from /18/. The influence of the reaction kinetics on remediation efficiency is assessed by varying the biomass concentration for specific bacteria involved in the dechlorination process. The direct oxidation of TCE in ISCO remediation is modeled with a first order depletion rate, assuming no oxidant limitation /7/.

The injected reactants (oxidant or donor/bacteria) are assumed to spread in horizontal injection zones, covering the whole width of the treatment zone (see zone in Figure 1). These injection zones are spaced at various intervals over depth, corresponding to the injection interval chosen (see Table 1).

### **Model simulations**

The model is used to assess the design requirements to achieve remediation with ERD or ISCO in reasonable timeframes. The influence of three controlling parameters on mass removal efficiency in the treatment zone is evaluated. The different scenarios are summarized in Table 1. It is assumed that active zones develop around each injection zone in the low-permeability matrix. This corresponds to diffusion of oxidant in the clay till for ISCO and to spreading of specific degraders and electron donor for ERD.

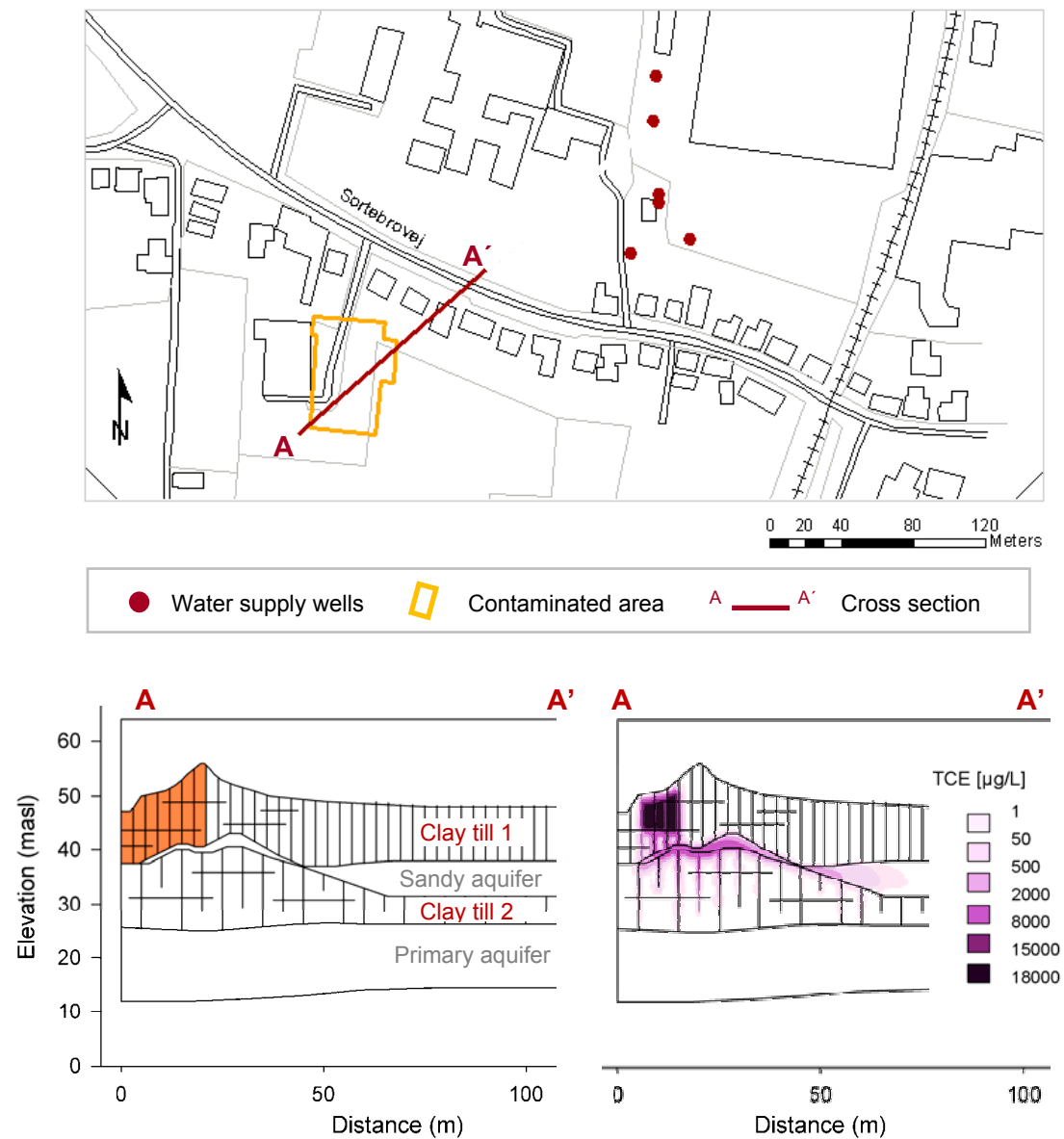


Figure 1 - Location of site and water supply wells. The transect shows the local geology used in the model. Fractures are shown as vertical lines. The modeled treatment zone is marked in orange. Initial aqueous TCE concentrations [ $\mu\text{g/L}$ ] used in the model is also shown. Note that the model used in this study does not consider the contaminant mass outside the treatment zone as it is intended to study the effect of the remediation.

Table 1 – Parameters used in the modeling study. The literature references for the parameter values are based on previous experience with laboratory and field scale modeling of similar processes in clayey till systems given for each parameter.

	Injection depth interval (cm) /19,20/			Active zone (cm) /7,8/			Reaction kinetics					
							Biomass concentration (cell/L) /8,21,22/			First-order degradation rate (d <sup>-1</sup> ) /7,10/		
ERD	25	50	100	0.05	0.15	0.25	10 <sup>8</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>10</sup>			
ISCO										1	3	7

## RESULTS

### Remediation with ERD – Influence of development of active zone

The modeled timeframes for contaminant mass removal in the treatment zone (sum of chlorinated solvents TCE, DCE and VC) are shown in Figure 2, for different thickness of bioactive zones in the clay matrix. The development of bioactive zones deep inside the clay matrix can significantly reduce the timeframe for mass removal (by a factor > 2 between 5 and 25 cm). Reasonable remediation timeframes (a few decades) can be reached only when dechlorination occur in most of the treatment zone. If the bacteria and electron donor do not spread into the clay matrix from the injection points, the remediation is limited by long term diffusion of contaminant trapped in the matrix far from the narrow bioactive zones (see results for bioactive zones of 5cm, with remediation times > 100 years).

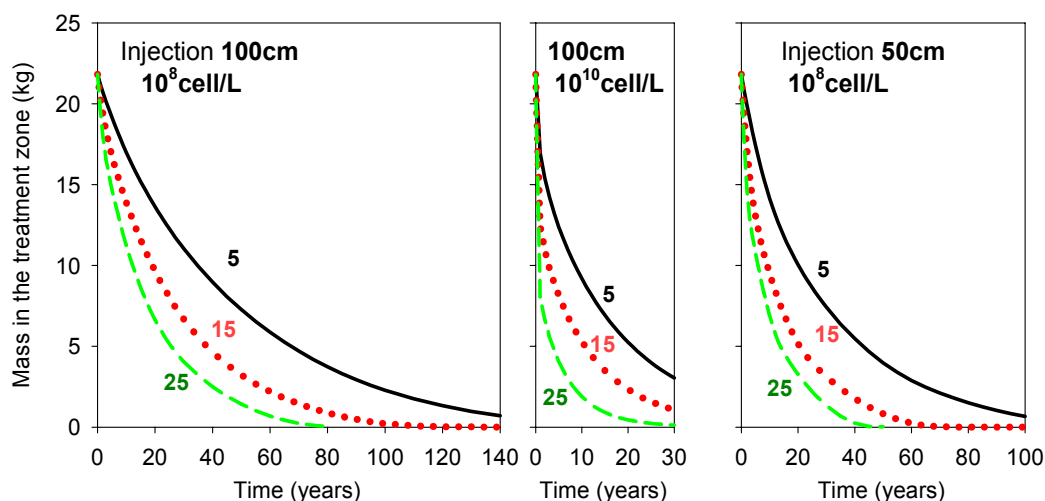


Figure 2 – Contaminant mass removal in the treatment zone with ERD for different thicknesses of bioactive zones (given on curves in cm), and combination of injection interval and biomass concentration.

The processes controlling the development of such bioactive zones inside the clay matrix are still not well characterized, and it has been shown that the thickness of these zones vary between different sites and also between different depths at specific site. It is probable that the main challenge, at sites where specific degraders are not present initially, is the spreading of

the injected specific degraders in the clay matrix, due to the limited pore size of typical tills and/or to the low-permeability of the matrix. Advection is hence limited in such low-permeability media, and spreading can occur mostly by diffusion. At sites where specific degraders are present before remediation, the development of bioactive zones in the matrix will mainly depend on the ability of the present bacteria to grow in the matrix to reach sustainable concentration. Further investigations on the parameters favoring development of bioactive zones (pore size, porosity, permeability, carbon source, ...?) need to be conducted to improve remediation design and reduce remediation timeframes.

### Remediation with ERD – Influence of injection interval

The influence of the injection interval on the mass removal is shown in Figure 3, where it can be seen that decreasing the interval by a factor of 4 can reduce the remediation timeframe by more than a factor of two. The diffusion length between the bioactive zones is reduced with decreasing injection interval and the locations where dechlorination can occur are then extended in the clay till matrix. It can also be noticed that in this modeling study, the injected material (bacteria and donor) is assumed to spread horizontally in high permeability layers and diffusing into the matrix to form a bioactive zone, around each injection depth. This might not occur if the clay till does not contain a high frequency of natural horizontal high permeability features. However it has been shown that close injection intervals can be obtained using direct-push delivery (down to 10cm spacing), but not with the current use fracturing techniques in Danish clayey till (pneumatic or hydraulic) /20/.

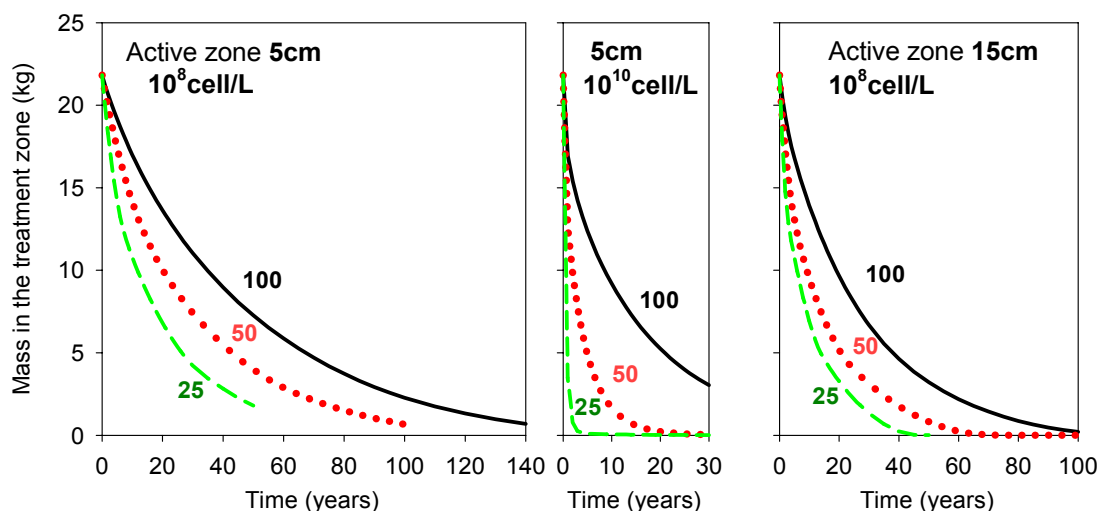


Figure 3 – Mass removal in the treatment zone with ERD for different injection intervals (given on curves in cm), and combination of active zone thickness and biomass concentration.

### Remediation with ERD – Influence of biomass concentration

The influence of the biomass (*Dehalococcoides*) concentration in the developed bioactive zones on the mass removal is shown in Figure 4. An increased biomass concentration causes faster dechlorination in the bioactive zones, and hence theoretically reduced remediation timeframes. However it can be seen that while the remediation time decreases when the biomass concentration increases from  $10^8$  to  $10^9$  cell/L, it does not decrease significantly for a higher biomass concentration (to  $10^{10}$  cell/L). This is due to the fact that the system is



diffusion limited (and not reaction limited), and that the remediation time is controlled by the diffusion of the contaminant to the bioactive zones, where the dechlorination occurs. Hence an optimum biomass concentration can be found (here around  $10^9$  cell/L) beyond which it does not help to increase the number of bacteria (or reaction rates further).

The biomass concentration depends on the ability of the injected bacteria to grow in treatment zone. *Dehalococcoides* concentrations (in water samples) of  $2 \cdot 10^7$  -  $4 \cdot 10^8$  cell/L (Rugårdsvej /8/),  $6 \cdot 10^8$  -  $6 \cdot 10^9$  cell/L (Gl. Kongevej /21/) and  $3 \cdot 10^8$  -  $1 \cdot 10^{11}$  cell/L (Sortebrovej /22/) have been measured in clay till sites after bioaugmentation. So the observations show that the optimum concentration can be achieved in practice.

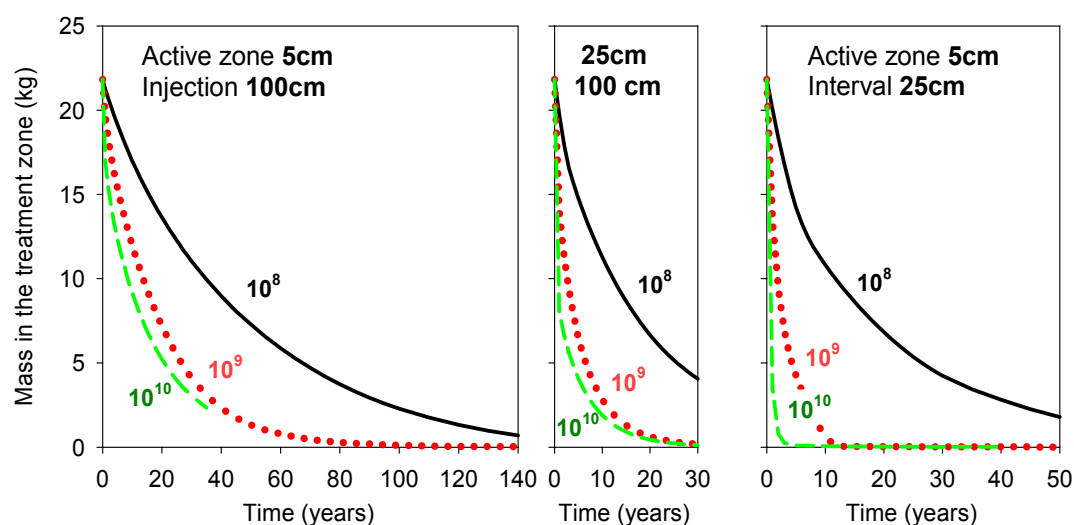


Figure 4 – Mass removal in the treatment zone with ERD for different biomass concentration (given on curves in cell/L), and combination of active zone thickness and injection interval.

### Remediation with ISCO

The reaction rate for ISCO is higher than for ERD, and as stated above, the timeframe for remediation does not depend on reaction rate for ISCO in low-permeability media, as the system is diffusion limited. This is illustrated in Figure 5, where it can be seen that the remediation time is not reduced by faster oxidation of the contaminant, due to slow diffusion in the low-permeability matrix. Therefore only the influence of the injection interval and thickness of active zones are investigated further.

The modeling results for ISCO are shown in Figure 6. ISCO remediation is faster than ERD due to the faster reaction rates and the single step degradation (TCE is oxidized directly to  $\text{CO}_2$ ). ISCO results in remediation between 1 and 80 years, depending on whether oxidation takes place in the entire matrix (combination of injection interval 50 cm and active zone 25 cm on each side) or only with 10 cm active zones (5cm on each side) spaced at 100 cm intervals.

The development of oxidation active zones in clay tills is controlled by diffusion of oxidant (e.g., permanganate) and by consumption of the oxidant due to reaction with the natural oxidant demand (NOD) of the clay till /7/. End product from oxidation (manganese dioxide) was

found after one year in zones between 2-3 cm and 15 cm at Dalumvej, where full scale ISCO was performed [10].

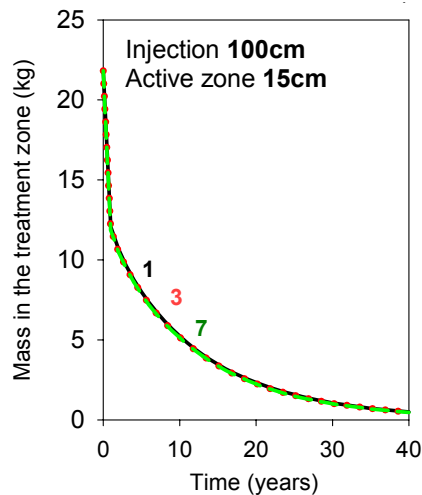


Figure 5 - Mass removal in the treatment zone with ISCO for different reaction rates (given on curves in  $\text{d}^{-1}$ ).

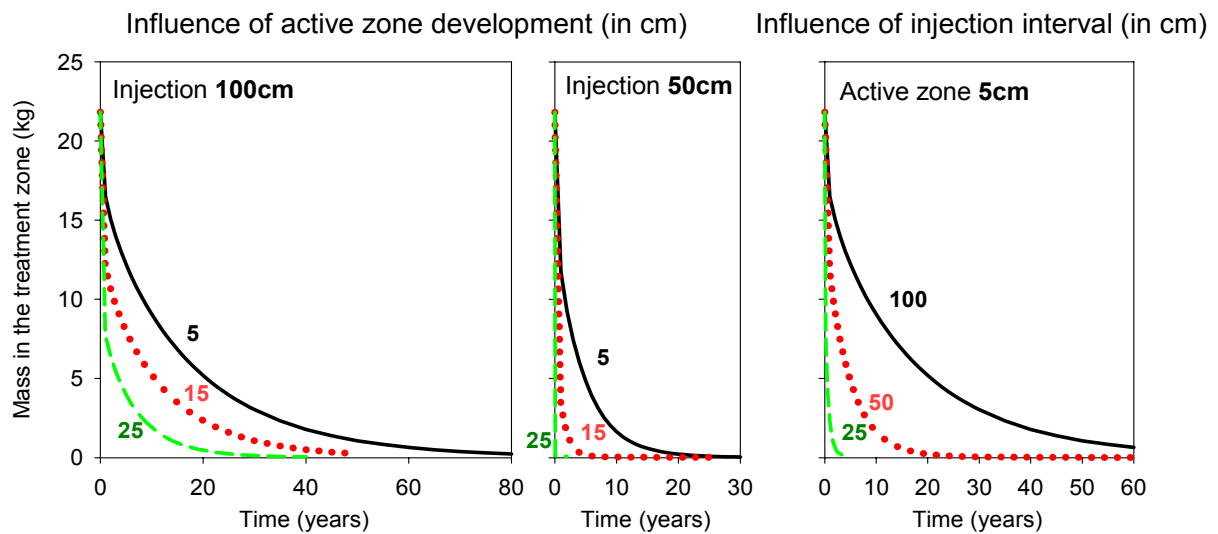


Figure 6 - Mass removal in the treatment zone with ISCO: left) for different active zone thicknesses (given on curves in cm) and injection interval 100 and 50 cm. right) for different injection intervals and active zone of 5 cm.

## DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The numerical model presented in this project can be used to assess the influence of three controlling parameters on remediation efficiency for ERD and ISCO. The mass removal efficiency (and so the remediation timeframes) depends greatly on the injection interval over the

depth and the development of active reaction zones inside the clay till matrix. Remediation timeframes can be reduced significantly using a closely spaced injection and by ensuring the efficient spreading of the reactants into the clay till matrix (oxidant or bacteria/donor). These observations suggest further investigations are needed to determine the parameters controlling the development of the active zones in the clay tills, and to assess the sites suitable for such remediation technologies. Furthermore the reaction kinetics also affect mass removal in the treatment zone, but reaches a maximum due to diffusion limitations, beyond which the remediation timeframes do not increase further. The influence of the three investigated parameters on the timeframes for removal of 90% of the initial contaminant mass is summarized for ERD and ISCO in Figures 7 and 8.

Finally this study focused on remediation efficiency in terms of mass removal in the treatment zone, but other parameters can influence the success and choice of remediation design, such as formation of daughter products, leaching of contaminants to the underlying aquifer, life cycle assessment, or environmental economics. These aspects have been studied for Sortebrovej in /22/.

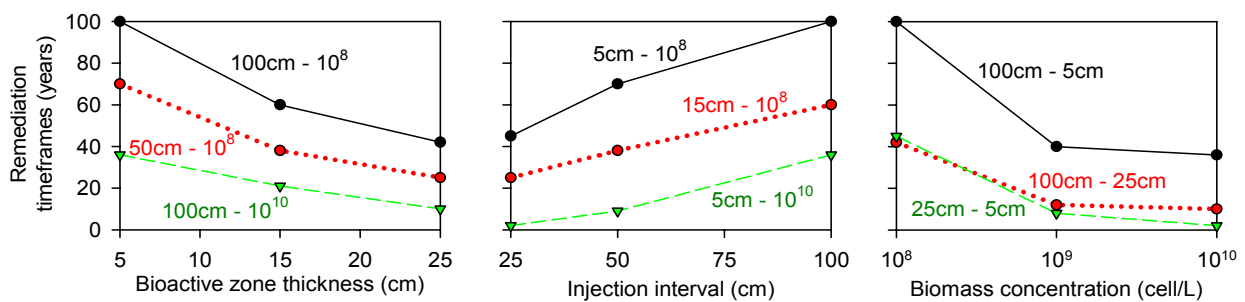


Figure 7 – Influence of the three parameters on remediation timeframes for mass removal (90%) with ERD. The numbers on the curves refer to the two other parameters values.

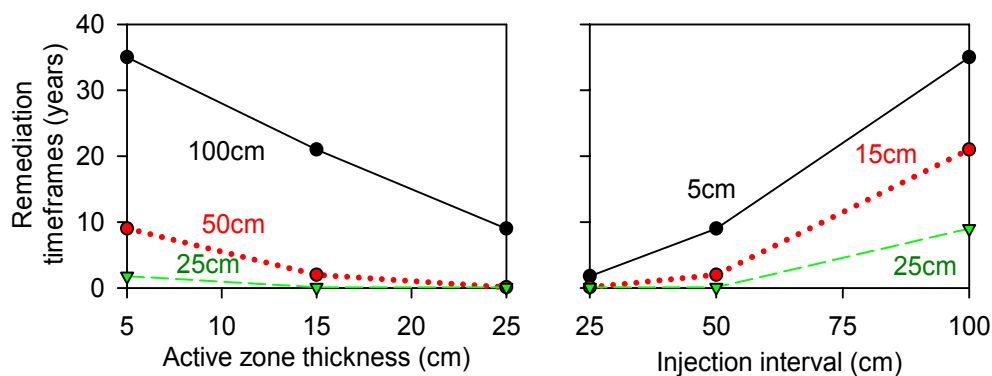


Figure 8 – Influence of the three parameters on remediation timeframes for mass removal (90%) with ISCO. The numbers on the curves refer to the other parameters value (interval or thickness).

## Literature Cited

- /1/ Plume persistence due to aquitard back diffusion following dense nonaqueous phase liquid source removal or isolation, Chapman, S. W. and Parker, B. L., 2005, *Water Resources Research* 41[12].
- /2/ Dissolved chemical discharge from fractured clay aquitards contaminated with DNAPLs, Falta, R. W., 2005, *Conference Proceeding, Dynamic of Fluids and Transport in Fractured Rock*,
- /3/ Diffusive loss of non-aqueous phase organic solvents from idealized fracture networks in geologic media, Parker, B. L., McWhorter, D. B., and Cherry, J. A., 1997, *Ground Water* 35[6], 1077-1088.
- /4/ Numerical examination of the factors controlling DNAPL migration through a single fracture, Reynolds, D. A. and Kueper, B. H., 2002, *Ground Water* 40[4], 368-377.
- /5/ Numerical-Analysis of Solute Migration Through Fractured Clayey Deposits Into Underlying Aquifers, Harrison, B., Sudicky, E. A., and Cherry, J. A., 1992, *Water Resources Research* 28[2], 515-526.
- /6/ Diffusive Contaminant Transport in Natural Clay - A Field Example and Implications for Clay-Lined Waste-Disposal Sites, Johnson, R. L., Cherry, J. A., and Pankow, J. F., 1989, *Environmental Science & Technology* 23[3], 340-349.
- /7/ Role of diffusion in chemical oxidation of PCE in a dual permeability system, Hønning, J., Broholm, M. M., and Bjerg, P. L., 2007, *Environmental Science & Technology* 41[24], 8426-8432.
- /8/ Field Evaluation of Biological Enhanced Reductive Dechlorination of Chloroethenes in Clayey Till, Scheutz, C., Broholm, M. M., Durant, N. D., Weeth, E. B., Jørgensen, T. H., Dennis, P., Jacobsen, C. S., Cox, E. E., Chambon, J. C, and Bjerg, P. L., 2010, *Environmental Science & Technology* 44[13], 5134-5141.
- /9/ Remediation of chlorinated solvents in clay till: Importance of diffusion, in Danish, Broholm, M. M., Scheutz, C., Begtrup, E., Bjerg, P. L., Jacobsen, C. S., Jørgensen, T. H., Nielsen, L., and Rasmussen, P., 2006, *Conference Proceeding, ATV Vintermøde 2006, Vintermøde om Jord-og grundvandsforurening*
- /10/ Kemisk oxidation med permanganat. Omsætningshastigheder og spredning i moræner, 2006, Report Nr. 1066, Miljøstyrelsen,
- /11/ Oprensning af klorerede opløsningsmidler i moræner med stimuleret reduktiv deklorering - Pilotforsøg - Rugårdsvej 234-238, Odense, 2007, Cowi, DTU and Geosyntec, Region Syddanmark.
- /12/ Videregående monitoring af oprensning på Sortebrovej – Kerneprøvetagning 2008, 2008, Notat, DTU Miljø, Region Syddannemark.
- /13/ Model assessment of reductive dechlorination as a remediation technology for contaminant sources in fractured clay: Case studies. Delrapport III, 2009, Report Nr. 1296, DTU Miljø, Miljøstyrelsen. Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening.
- /14/ Modeling in-situ enhanced reductive dechlorination at Sortebrovej - What can we learn in terms of efficiency and timeframe?, Chambon, J. C, Manoli, G., Broholm, M. M, Christophersen, M., Binning, P. J., and Bjerg, P. L., 2010, *Conference Proceeding, ATV Jord og Grundvand - Møde nr. 57, Naturlig og stimuleret biologisk nedbrydning - processer og mikrobiologi*
- /15/ Geologisk model, Tidligere maskinværksted, Sortebrovej 26, Tommerup, Detaljeret geologisk model af de glaciale aflejringer, 2009, Orbicon, Region Syddanmark.
- /16/ Undersøgelser til vurdering af stimuleret in-situ reduktiv deklorering og kemisk oxidation ved oprensning af grundvandsforurening - Forurennet lokalitet nr. 485-20 Tidligere maskinfabrik Sortebrovej 26, 5690 Tommerup, 2004, Hedeselskabet, Fyns Amt.

- /17/ Forureningsundersøgelse - Forurenet lokalitet nr. 485-20 Tidligere maskinfabrik Sortebrovej 26, Tommerup - Supplerende undersøgelse, 2001, GEO, Fyns Amt.
- /18/ Modeling multi-component transport and enhanced anaerobic dechlorination processes in a single fracture - clay matrix system, Chambon, J. C, Broholm, M. M., Binning, P. J., and Bjerg, P. L., 2010, Journal of Contaminant Hydrology 112, 77-90.
- /19/ Gl. Kongevej 39, Afværgeforanstaltninger, Dokumentationsrapport, 2006, Dokumentationsrapport, Orbicon A/S, Roskilde, Miljøkontrollen.
- /20/ Comparison of Delivery Methods for Enhanced In Situ Remediation in Clay Till, Christiansen, C. M., Damgaard, I., Broholm, M., Kessler, T., Klint, K. E., Nilsson, B., and Bjerg, P. L., 2010, Ground Water Monitoring and Remediation 30[4], 107-122.
- /21/ Vurdering af stimuleret in-situ reduktiv dechlorering i lermatricen på Gl. Kongevej 39, 2011, DTU Miljø, Region Hovedstatden.
- /22/ Monitering, modellering og miljøvurdering af fuldskala afværge af TCE forurening ved stimuleret reduktiv dechlorering, Sortebrovej 26, Tommerup, 2011, Orbicon and DTU Miljø, Region Syddanmark.

# AFPRØVNING AF 5 FORSKELLIGE DOKUMENTATIONSMETODER TIL VURDERING AF SPREDNING I MORÆNELER

Civilingeniør, ph.d. Thomas H. Larsen  
Civilingeniør Pernille Palstrøm  
Civilingeniør, ph.d. Nina Tuxen  
Kresten L. Andersen  
Orbicon A/S

Michael Neuhausen  
Fugro

Civilingeniør Henriette Kern-Jespersen  
Civilingeniør, ph.d. Camilla Maymann Christensen  
Geolog Mads Terkelsen  
Region Hovedstaden

## **ATV JORD OG GRUNDVAND**

Levering af reaktive stoffer i lavpermeable aflejringer.  
"It's a contact sport!"

Møde 16. juni 2011



## INDLEDNING OG BAGGRUND

Der har gennem de seneste 5-10 år været fokus på anvendelse af både kemiske og biologiske metoder til oprensning af klorerede opløsningsmidler. Særligt i inhomogene aflejringer som moræner, har det i en række tilfælde vist sig ganske vanskeligt at få fordelt de injicerede reaktanter. I en del oprensninger viser det sig typisk, at der opnås en rimelig effektiv oprensning i de højere permeable dele af joden og lille eller ingen oprensning i de mindre permeable dele. Dette hænger bl.a. sammen med en ujævn fordeling.

Fordeling af væsker i jorden kan ske med en række metoder. De mest anvendte har været faste installationer af filtre, der evt. pumpes på og injektioner ved direct push teknikker. Herudover har der været anvendt pneumatisk og hydraulisk frakturering til at øge mængden og spredningen af reaktanter. Direct push teknikker ser ud fra en række injektioner ud til at kunne fordele væsker i et vist omfang. Spredningen i jorden afhænger af jordens egenskaber, selve værktøjet der injiceres igennem, tryk og flowrate, viskositet, afstanden mellem punkter, der injiceres i både vertikalt og horisontalt og formentlig en række andre faktorer. Der er således et stort udfaldsrum for hvordan og hvor effektivt en given strategi er. Derfor er der også et behov for løbende at kunne revidere den strategi, der anvendes til at få spredt sine reaktanter i jorden afhængig af disse forhold og hermed også et behov for en dynamisk metode, der løbende kan evaluere spredningen af den reaktant man injicerer.

Typiske reaktanter der injiceres er/har været permanganat, persulfat eller Fentons opløsninger til kemisk oxidation og opløsninger af sukkerstoffer som melasse, laktat, eller forskellige formere for emulgerede olier. Da injektionen ofte foretages i dybder på op til 10 meter eller mere er der behov for målemetoder, så stofferne kan erkendes direkte i jorden, alternativt ved tilsætning af tracere, der kan måles. Nogle af stofferne har i sig selv egenskaber der gør, at de kan detekteres, eksempelvis har permanganat i sig selv en farve og væsken der injiceres en høj elektrisk ledningsevne, mens andre reaktanter har egenskaber, der ikke lige gør en simpel måling mulig direkte.

Teknikker der tidligere er blevet anvendt til vurdering af spredningen i injektioner er:

- Udtag af jordprøver med måling for specifik reaktant.
- EC (Electrical conductivity) Måling af elektrisk ledningsevne i jorden med dipol eller wenner opstilling monteret på en probe.
- LIF (Laser Induced Fluorescence). Belysning i jorden og måling af fluorescens fra tilsatte stoffer.
- Udgravning og fluorescensdetektion af spredningsveje på baggrund af fotos af flader.
- Udtag af vandprøver med efterfølgende detektion af relevante komponenter.

Særligt EC proben monteret på Geoprobe udstyr har været anvendt i Danmark i forbindelse med direct push injektioner, da den af mange har været anset for en enkel, hurtig og relativt billig metode til at tilvejebringe information om spredningen. I de tilfælde hvor det eksempelvis har været emulgerede olier, der skulle spredes, har man tilsat en elektrisk ledende tracer, typisk natriumbromid, til den opløsning der er injiceret.

Der har i forbindelse med en række sager i 2010 været rejst tvivl om EC metodens validitet bl.a. baseret på nogle teoretiske overvejelser udført af Orbicon. Region Hovedstaden besluttede bl.a. på den baggrund, at der var behov for en sammenligning af forskellige metoder. Dette hang konkret sammen med anvendelse af SRD som en del af en afværgestrategi på Vasbyvej,



Hedehusene. Selve forsøget fandt sted i det tidlige forår 2011, og de vigtigste erkendelser er gennemgået i de følgende afsnit.

## MATERIALER OG METODER

Der blev på et prøvefelt på Vadsbyvej 16 i Hedehusene injiceret en blanding bestående af følgende komponenter:

- Melasse 90 kg/m<sup>3</sup>.
- Brilliant blue 10 kg/m<sup>3</sup> (opløsning 8,6-9,2 % aktivt stof).
- Tryptophan 0,25 kg/m<sup>3</sup>.
- Natriumbromid 7,5 kg/m<sup>3</sup>.

Selve injektionen blev udført af Ejlskov ved direct push teknik i et felt bestående af 6 injektionspunkter, hver sat med 1,5 meters mellemrum. I korte træk injiceres der minimum for hver 25 cm i intervallet fra 0,5-4 m u.t. og for hver 10 cm i intervallet 4-8 m u.t. I intervallet 0-4 m u. t. injiceres der ca. 16 l pr. punkt, mens der i intervallet 4 til 8 m u. t. injiceres omkring 8 liter pr. punkt, svarende til godt 500 l pr. boring. Der er anvendt to startdybder på injektionerne benævnt AI og BI på figur 1. AI har startet injektionen i 0,5 m under terræn. BI i 0,63 m u.t. Til at drive injektionen er der anvendt en stempelpumpe, der løbende er monitoreret for opbygget tryk og flow. Stempelpumpen er karakteriseret ved, at den giver det ønskede flow ensartet over hele trykområdet.

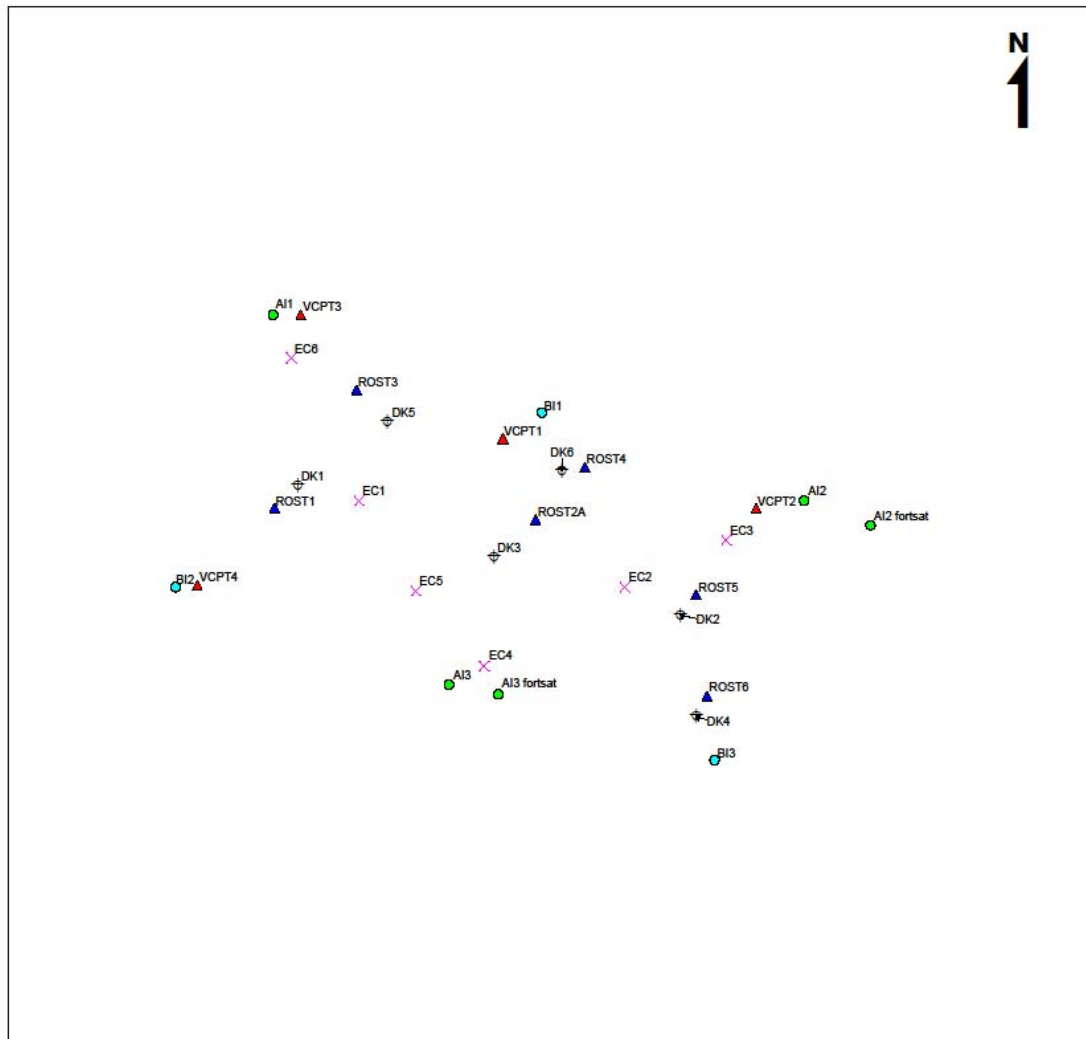
Geologien på ejendommen består af moræneaflejringer med varierende hårdhed og sandindhold. Generelt træffes redoxfronten omkring 4 m u.t.

Til at vurdere udbredelsen og teste forskellige metoder er der afprøvet følgende dokumentationsteknikker:

- Dipol EC målinger. Disse er udført ved nedramning af EC dipol sonde med Geoprobe. Arbejdet er udført af Ejlskov AS. Formålet er at detektere den tilsatte bromid i blandingen og salte i melasseblandingen.
- Kerneprøver. Disse er udført af Ejlskov as. Efter optag i linere er kernerne opskåret af Orbicon, inspiceret visuelt og fotograferet med henblik på en overordnet identifikation af farvestoffet Brilliant blue. Kernerne er herefter skåret i 25 cm stykker, der efterfølgende er analyseret for bromid indhold af Højvang.
- ROST/LIF. Laser induced fluorescence probing er udført af Fugro N.V. Der er anvendt Fugros ROST system til identifikation af tryptophan. ROST systemet er monteret på en CPT rig. ROST systemet er baseret på udsendelse af monokromatisk laserlys gennem en optisk fiber til et lille vindue i proben. Det dannende fluorescerende lys bringes op til en multiplexer og en fotomultiplier så lysets spektra kan identificeres og kvantificeres. Tryptophan er en aminosyre, der har en fluorescens, der passer til de bølgelængder som ROST systemet anvender. ROST er egentlig udviklet til at detektere olieprodukter og tjære i jorden, men da tryptophan har fluorescens bånd, der ligner disse stoffer en del, kan det ligeledes anvendes til detektion af dette.
- Videoprobe, VCPT. Direkte videooptagelse i jorden er udført af Fugro/Deltares. Metoden bygger på nedføring i jorden af et kamera med blitz monteret på en CPT rig. Der optages et billede pr. 1 cm nedtrængning. Efterfølgende kan billederne inspiceres for tilstedeværelse af Brilliant blue direkte.

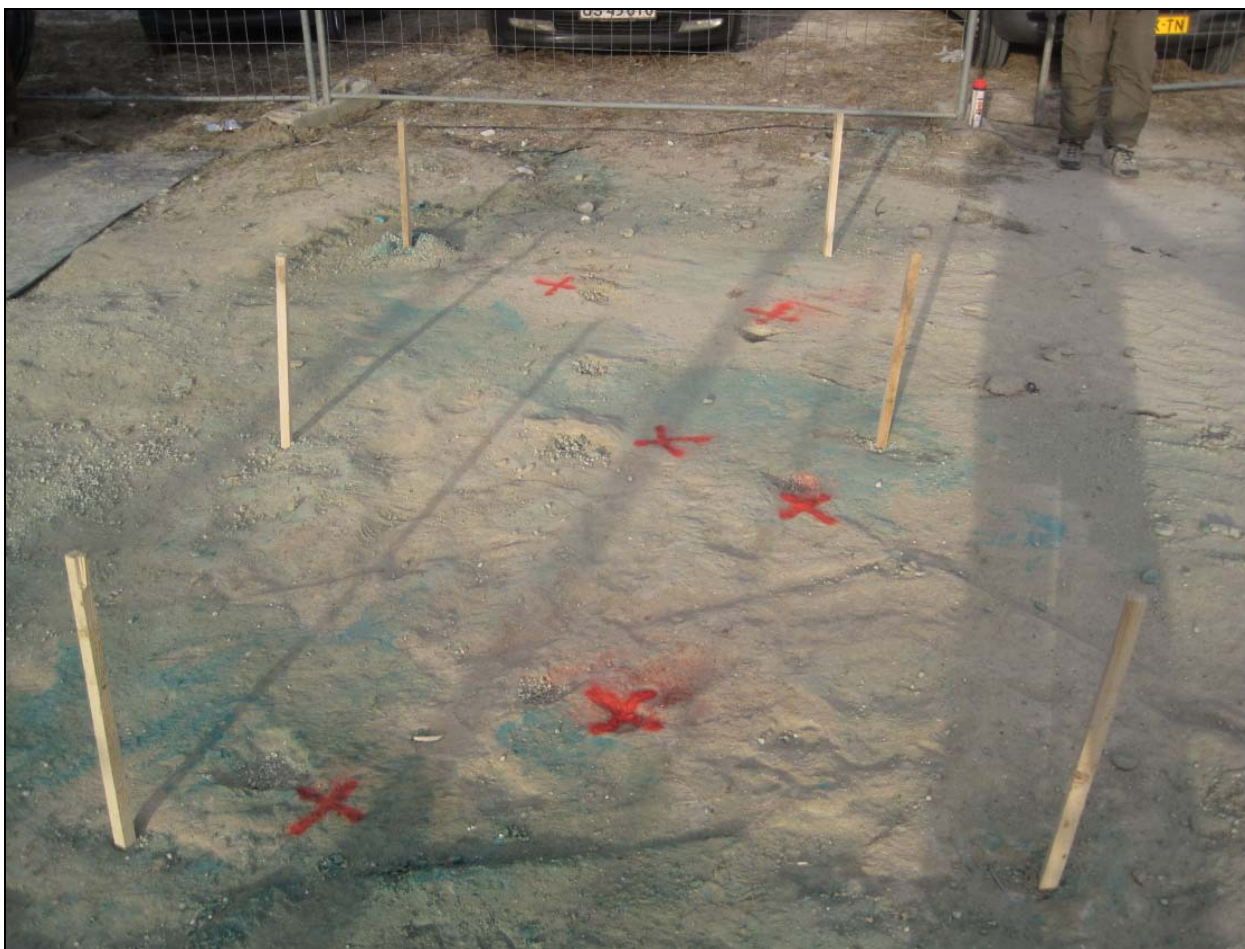
Der er udført 6 EC målinger samt en baggrund, 6 kerneprøver, 6 ROST sonderinger samt en baggrund og 4 VCPT sonderinger i feltet.

På grund af risikoen for, at sonderingerne skal løbe ind i hinanden var det nødvendigt at have lidt afstand i mellem disse. På figur 1 er vist en plan over samtlige sonderingers placering.



Figur 1 Placering af samtlige injektions filtre. Skalaen på figuren er ca. 1:40, der er ca. 1,5 meter imellem injektionspunkterne benævnt A og B. Der observeres lidt Brilliant blue på overfladen fra gennembrud af væske

På figur 2 er vist et foto af injektionspunkterne sammen med de afsatte punkter til ROST sonderingerne.



Figur 2 Foto illustration af placering af injektionspunkter (pæle) og planlagte ROST sonderinger (krydser) i injektionsfeltet

## RESULTATER

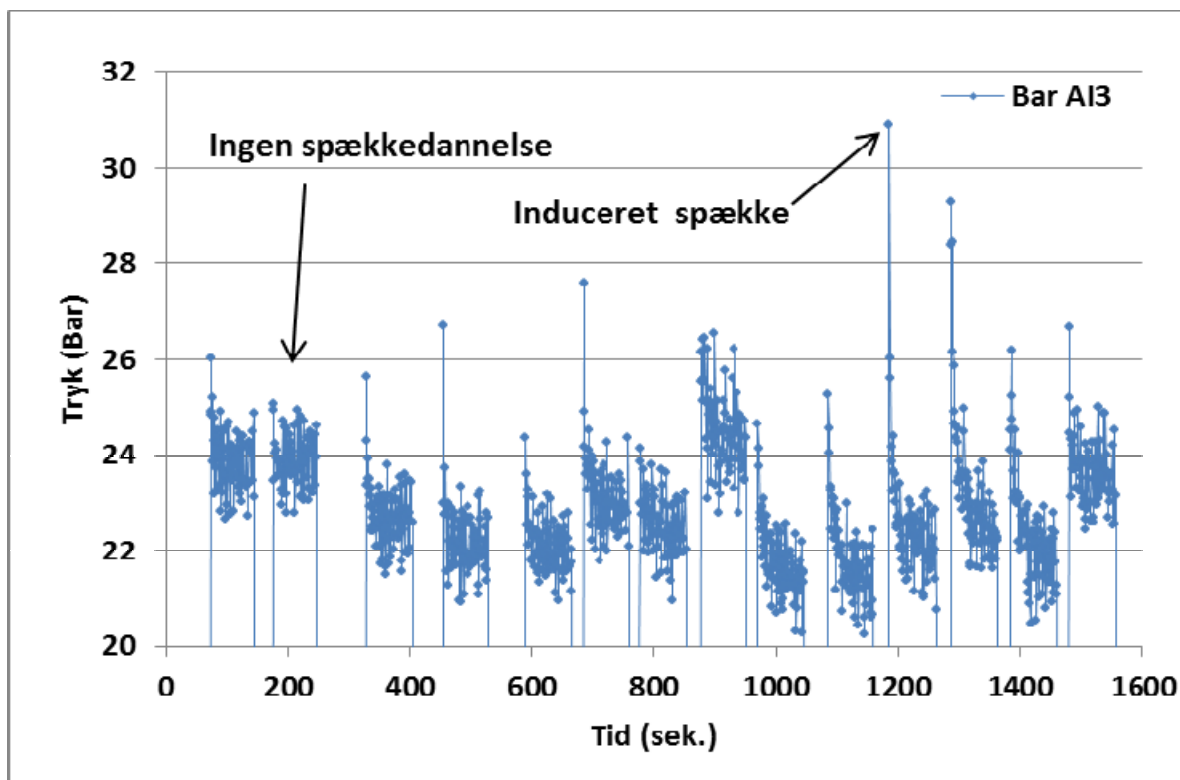
### *Injektionen*

Selve injektionen forløb rimeligt planmæssigt, hvor de planlagte mængder rent fysisk kunne injiceres. Der blev konstateret enkelte gennembrud i gamle borehuller, rodgange og lignende, men i det store hele blev den injicerede mængde på ca. 3.000 liter under jordoverfladen.

I figur 3 er illustreret trykopbygningen ved injektionen i AI3. Trykket blev målt ved pumpen før slangen går ned igennem rørene til injektionsfilteret. Der er således et "baggrundstryk", der opstår pga. af væskens strømning inden den når filteret, der skal korrigeres for, for at finde det tryk, der rent faktisk er i jorden. Dette "baggrundstryk" er i størrelsen 23 bar afhængig af, hvor mange bugtninger mm. der er på slangen.

Som det ses af figur 3 er der tale om 2 forskellige typer af situationer i forbindelse med injektionen. Den ene kan karakteriseres ved, at væsken når den strømmer ud af sonden følger noget, der i princippet svarer til Darcy strømning. I disse tilfælde ses ikke en trykopbygning af betydning i forbindelse med strømningen. Den anden situation er karakteriseret ved dannelsen af frakturer under strømningen. Disse er karakteriseret ved en trykopbygningen, der udløses ved, at væsken strømmer når der dannes en sprække strømningen kan foregå i. Trykket der opbygges overskrider de

kræfter, der holder jorden sammen, således at et egentligt hulrum opstår. Man kan ikke ud fra tryk kurven sige noget om, hvor frakturen dannes og hvor stor den umiddelbart er. Det kan således ikke afsløres om væsken strømmer op langs røret eller direkte ud i jorden fra disse kurver.



Figur 3 Tidslig variation af trykudvikling i 0,5 til 3,75 m u.t. ved injektion i AI3. Hver punktsværm repræsenterer et niveau 25 cm dybere end det foregående

Baseret på en overordnet gennemgang af de opsamlede tryk og flowdata er der tale om frakturering i ca. 95 % af injektionerne.

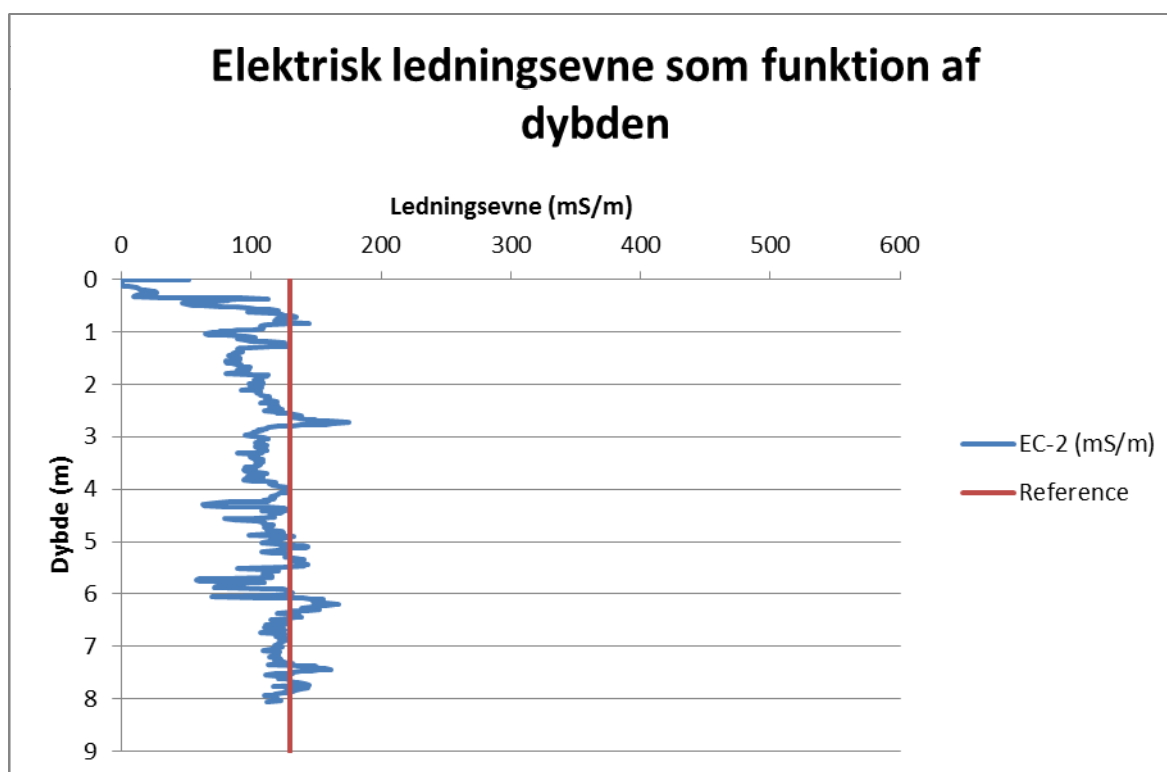
#### *EC probing*

Den elektriske ledningsevne af den injicerede væske var ca. 1.400 mS/m, heraf giver den tilsatte NaBr ca. 800 mS/m. Den udførte baggrundssondering indikerede et niveau af ledningsevnen i intervallet 0,5-8 m u.t. på 80-120 mS/m. I injektionsfeltet er det derfor kun udslag over 130 mS/m, der er tolket som positive i forhold til tilstedeværelse af den injicerede blanding. Fund er bestemt som andelen af udslag, der ligger over 130 mS/m. "Koncentrationen" er bestemt som andelen af udslaget over 130 mS/m i forhold til maksimaludslaget (1.400 mS/m). "Massen" er bestemt som summen af udslaget over 130 mS/m gange højden for en måling.

I figur 4 er vist et eksempel på et EC profil fra EC-2. Der ses her signifikante udslag startende knap 1 m u.t. Som det ses er det højeste udslag på ca. 170 mS/m svarende til godt 10 % af det maksimale udslag. I tabel 1 er de vigtigste data fra EC sonderingerne samlet.

Tabel 1. EC sonderingernes fund summeret. C.V. angiver standardafvigelsen normeret med gennemsnittet

EC Boring	Afstand til injektionspunkt (m)	Fund %	Gennemsnitlig "koncentration"	"Masse" af udslag under 2 m dybde
EC-1	1,08	3 %	0,3	46 %
EC-2	1,03	16 %	1,9	98 %
EC-3	0,46	49 %	14,3	71 %
EC-4	0,21	26 %	16,7	94 %
EC-5b	0,53	24 %	7,1	93 %
EC-6	0,25	7 %	3,7	1 %
Middel	0,59	21 %	7,3	67 %
C.V.	64 %	79 %	92 %	56 %



Figur 4 Profil af elektrisk ledningsevne fra 0-8 m u.t. i EC2. Den røde linie angiver 130 mS/m, hvilket er vurderet som værende maksimalt baggrunds niveau.

### Kerneprøver

De udtagne kerneprøver blev visuelt inspiceret efter gennemskæring og fotografering. Det var generelt ret vanskeligt at erkende Brilliant blue farven på de opskårne kerner i felten. Eksempler på veldokumenterede indhold ses som figur 5 og 6.

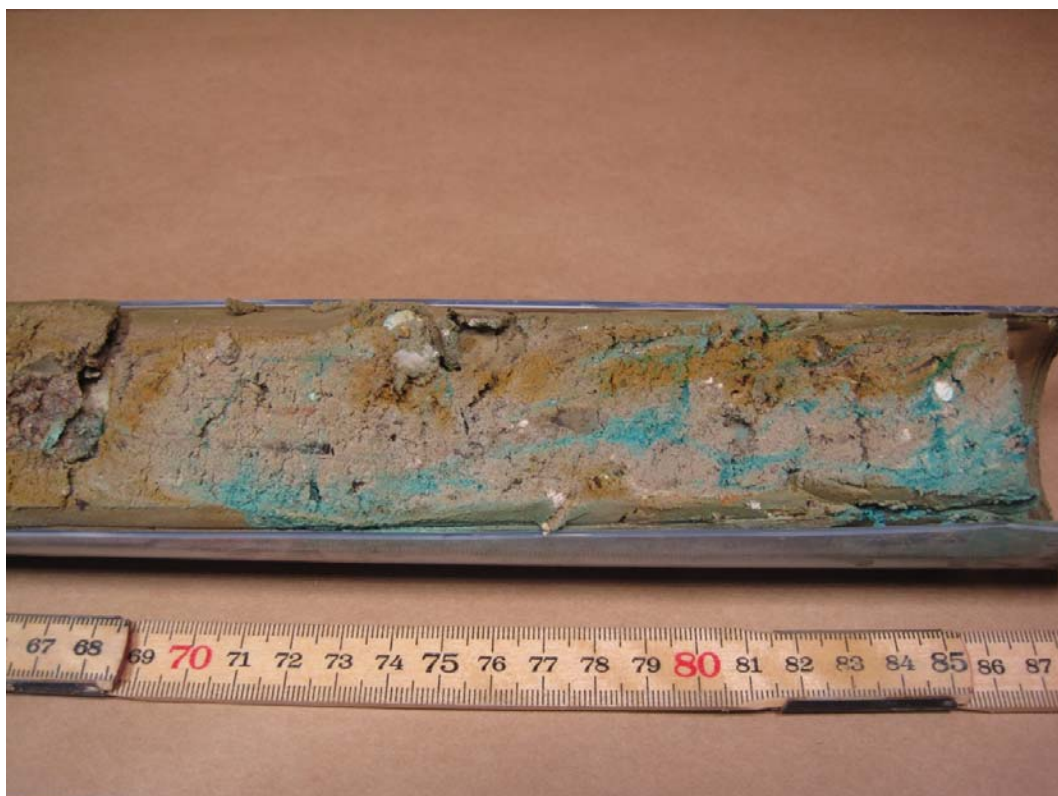
Det er ikke forsøgt at opmåle arealer eller lignende mål på kernerne til at vurdere det kvantitative indhold ud af Brilliant blue. Det kunne konstateres, at fordelingen var meget uensartet og ikke umiddelbart repræsenterede veldefinerede strata eller lignende.

Kernerne blev efter den visuelle inspektion opskåret i 25 cm stykker, der blev analyseret for bromid uden yderligere neddeling af prøvemængden. Baggrundsniveauet var under detektionsgrænsen for analysemetoden (2 mg/kg). Injektionen er dimensioneret ud fra et ønske om, at ca. 6 % af porevolumenet (samlet set estimeret til 0,30 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) fyldes med injektionsvæsken. Dette svarer til en koncentration på ca. 50 mg Br/kg våd jord.

Hvis hele porevolumenet er fyldt med injektionsvæske vil koncentrationen af bromid svare til ca. 830 mg Br/kg.

På figur 7 er vist et eksempel på et bromidprofil fra DK2. Der ses her en spredning, der indikerer tilstedeværelse af store dele af den injicerede væske i den allerøverste del af jordsøjlen. I tabel 2 er de vigtigste data fra kerneboringerne samlet.

Det ses, at der er fundet bromid i ca. 70 % af prøverne, at den primære andel af massen (60 %) ligger i de øverste 2 m af jordsøjlen. Den gennemsnitlige koncentration er ca. 20 mg/kg, hvor der blev sigtet efter ca. 50 mg/kg.

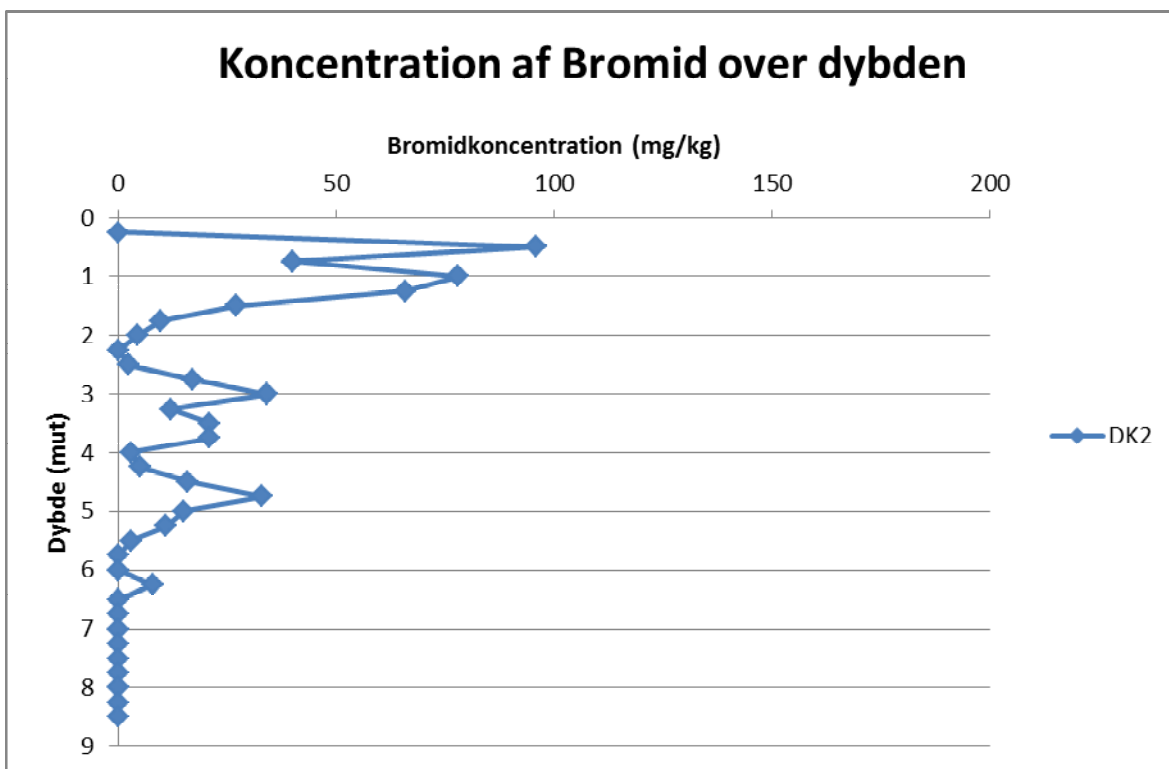


Figur 5 Nærbillede af DK1 nederste del af kerne 0-1,22 cm. Det ses at der kun var ca. 80 cm materiale i den øverste kerne. Den blå farve ses tydeligt i de mere sandede partier af den oxiderede ler





Figur 6 Nærbillede af DK2 nederste del af kerne 3,66-4,88 cm. Den blå farve ses noget svagere på den reducerede lers baggrund, men kan dog erkendes



Figur 7 Koncentrationen af bromid som funktion af dybden i DK2

Tabel 2. DK sonderingernes fund summeret. C.V. angiver standardafvigelsen normeret med gennemsnittet

DK Boring	Afstand til injektionspunkt (m)	Fund %	Gennemsnitlig koncentration (mg Br/kg)	Masse af udslag under 2 m dybde
DK1	0,85	50 %	14	23 %
DK2	0,79	62 %	15	38 %
DK3	0,72	79 %	24	42 %
DK4	0,25	91 %	24	82 %
DK5	0,83	89 %	38	45 %
DK6	0,33	54 %	14	12 %
Middel	0,63	71 %	22	40 %
C.V.	42 %	25 %	44 %	59 %

#### *ROST/LIF sonderinger*

De direkte opsamlede data er efterfølgende blevet processeret af Fugro med henblik på at visualisere de dele af det opsamlede spektrum, der kan henføres til tryptofanen.

På figur 8 er vist et eksempel på de leverede plots. Udover ROST data er yderligere data fra CPT sensorerne angivet.

Det maksimale udslag på den injicerede blanding var ca. 40 % i forhold til en intern standard.

Arealerne der angiver tilstedeværelse af tryptophan er målt op i de leverede spektra for at beregne "koncentrationer" og fund procenter til sammenligning med de andre metoder. Disse data er præsenteret i tabel 3.





### VCPT sonderinger

Der blev udført 4 ud af 6 planlagte sonderinger med VCPT sonden, de 2 ud af de 4 ikke til planlagt dybde, da kameraet efter kontakt med en sten måtte returtrækkes for reparation.



Figur 9 VCPT sondens vindue efter kontakt med sten. De ses en medrivning af det rustfri stål langs modsatte side af vinduet

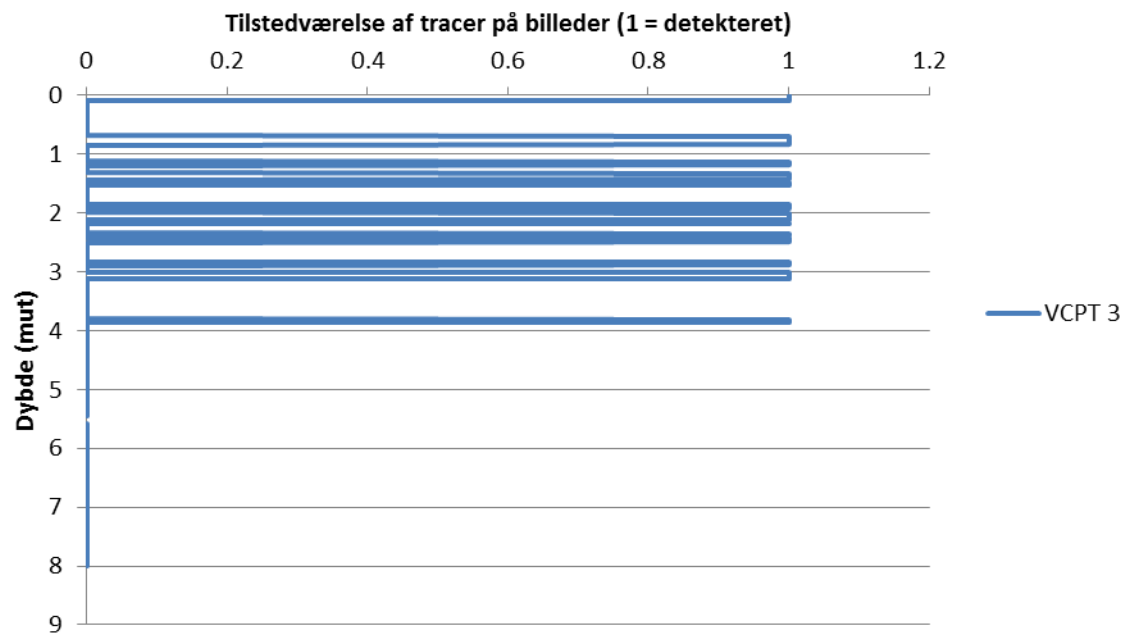
Billederne er efter optagelse gennemgået med henblik på, om der kan detekteres Brilliant blue. Billeder hvor der er konstateret farvestof har fået værdien 1, og billeder hvor der ikke er konstateret farve 0, således at et profil som vist i figur 10 har kunnet udarbejdes. Figur 11 viser et eksempel på et billede, hvor farven ses tydeligt.

I lighed med de andre metoder er fundprocenten opgjort. Det er ikke ved metoden muligt umiddelbart at angive en form for koncentration. I tabel 4 er de samlede resultater angivet.

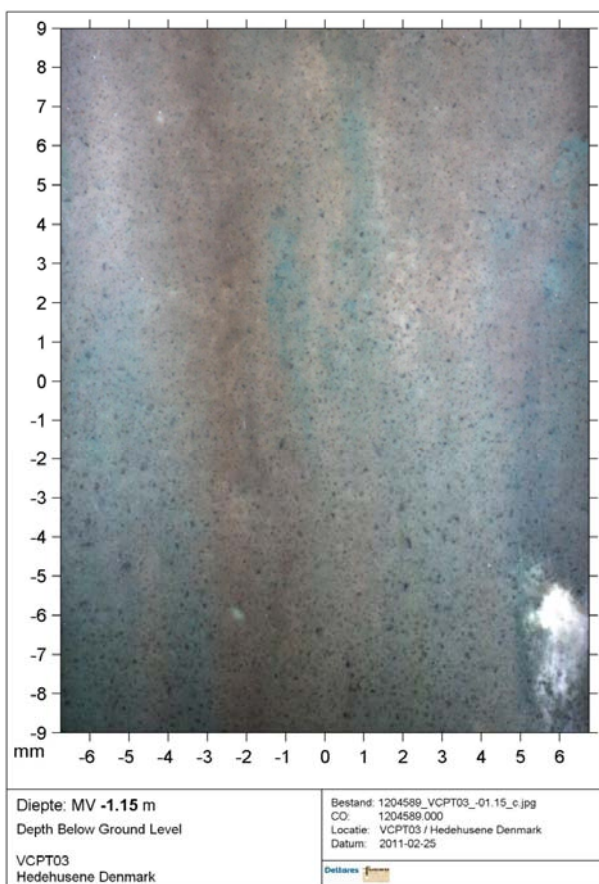
Tabel 4. VCPT sonderingernes fund summeret

VCPT Bo-ring	Afstand til injektionspunkt (m)	Fund %	Gennemsnitlig "koncentration"	"Masse" af udslag under 2 m dybde
VCPT1	0,26	24 %	-	65 %
VCPT2	0,26	17 %	-	79 %
VCPT3	0,15	12 %	-	47 %
VCPT4	0,12	68 %	-	52 %
Middel	0,20	30 %	-	61 %
C.V.	37 %	85 %	-	52 %

## Visuel identifikation i VCPT3



Figur 10 Vurdering af tilstedeværelse af tracer i dybden ud fra billeder på 1•2 cm. Tilstedeværelse er sat til værdien 1



Figur 11 Billede fra VCPT 3 sonderingen i 1,15 m u. t.

## DISKUSSION

### *Injektionen generelt*

Overordnet ses en meget uensartet fordeling af injektionsblandingen. Baseret på DK boringerne ses der fund i minimum ca. 50 % af samtlige prøver udtaget med 25 cm vertikal opløsning. Generelt er hovedparten af den injicerede masse fordelt i de øverste ca. 2 m af jordmatricen, svarende til at mere end 50 % af massen er i de øverste 25 % af den jordsøjle der er injiceret i. Dette understøttes særligt af DK boringerne, og i et mindre omfang af EC, ROST og VCPT sonderingerne. Afstanden til injektionspunkterne korrelerer også dårligt med fund procenterne. Herudover kunne der ved injektionen konstateres, at der i en række tilfælde ikke er en trykopbygning før strømmingen opstår, hvilket bl.a. kan forklares ved spredning op langs stangen og ud i formationen højere oppe. Da den øverste del er umættet og har større indhold af sprækker ormehuller mv. vil væsken generelt have mindre modstand mod at strømme ud her i forhold til de dybere dele af jorden.

### *Bromidanalyser*

Bromidanalyserne betragtes som den bedst beskrivende parameter for spredningen som helhed. Metoden er baseret på kemisk analyse og derfor relativt sikker sammenlignet med de andre metoder. Ulempen rent teknisk er den relativt lave vertikale opløsning sammenlignet med de øvrige metoder, samt at den er tidskrævende at udføre. Herudover er analyserne i dette tilfælde udført på laboratorium, hvilket gør at metoden, som anvendt her, ikke umiddelbart kan anvendes i forbindelse med en dynamisk opfølgning på injektionerne. Dette kan dog overkommes ved at måle med en feltmetode.

### *EC probing*

I forhold til bromidanalyserne ses, at den gennemsnitlige afstand til injektionsboringerne for EC boringerne er sammenlignelig med afstanden for udtag af kerner. For EC boringerne ses heller ingen tydelig sammenhæng mellem afstanden til nærmeste injektionspunkt og det relative andel af fund.

Generelt er der kun konstateret fund i 21 % af målingerne i forhold til de 71 % af bromidanalyserne, se tabel 1 og 2. Spredningen på de målte "koncentrationsudslag" er ligeledes væsentligt større end for bromidanalyserne. En del af dette kan sikkert tilskrives, at den vertikale opløsning er større for EC metoden, hvilket vil øge spredningen. Dog vurderes fundprocenten ved EC metoden at være for lav på trods af dette. Et mere urovækkende resultat er, at fordelingen mellem den øvre og nedre del er noget forskudt for EC metoden sammenlignet med bromidanalyserne.

Vurderes der på eksempelvis EC2 og DK2, der er lokaliseret ca. 30 cm fra hinanden, er der også kun et begrænset sammenfald mellem niveauerne med udslag. I DK2 ses langt hovedparten af massen at ligge over 2 m u. t., hvilket ikke på nogen måde gør sig gældende i EC2.

Der er således indikationer af, at EC metoden ikke beskriver fordelingen af den injicerede væske særlig godt. Den lave fundprocent kan muligvis skyldes, at der ved de fundne koncentrationer ikke er nok kontrast i forhold til den omgivende jord til at bringe signalet op over baggrunds niveauet.

### *ROST/LIF probing*

Fundprocenten i ROST boringerne er 10 %, hvilket er lavt sammenlignet med bromidanalyserne. Spredningen på koncentrationsmålene ses at være tilsvarende større. Den masse der konstateres med ROST målingerne ses generelt at ligge i den øverste del af jordsøjlen, dvs. ned til ca. 2 m u. t., hvilket også ses for bromidanalyserne.

Direkte sammenligning kan vurderes på baggrund af DK4 og ROST 6, der er placeret 15-20 cm fra hinanden. Den vertikale fordeling i disse to sonderingerne ligner i et vist omfang hinanden, dog ser

følsomheden på ROST sonden ud til at være lavere. DK2 og ROST5 er ligeledes placeret tæt på hinanden. Disse to har i hovedtræk også fordelinger der ligner hinanden. ROST4 og DK6 ligner ligeledes hinanden med store udslag i dybden omkring 1,5 m u. t.. Følsomheden ser dog ud til at lavere end for bromidanalyserne.

Overordnet ser det ud til, at den kvalitative fordelingsbeskrivelse rammes godt med ROST sonden og tryptofan. Følsomheden er dog for lav ved den anvendte koncentration. Der skal derfor arbejdes videre med højere koncentrationer og evt. uden Brilliant blue, der kan reducere fluorescenssignalet pga. quenching, hvis metoden skal kunne anvendes generelt.

#### *VCPT probing*

Den gennemsnitlige fundprocent for VCPT sonderingerne er 30 %, svarende til lidt under halvdelen af, hvad der findes i bromidanalyserne. Set i betragtning af, at afstanden til injektionspunkterne er kortere, er det et ret lavt resultat. Kun i VCPT4, der står 12 cm fra et injektionspunkt, konstateres fund i samme størrelsesorden som i bromidanalyserne. Der er som tidligere beskrevet udfordringer i at se den blå farve, når den ikke optræder massivt, hvilket kan forklare den relativt lave fundprocent. I forhold til hvor der konstateres masse kan det ses, at ca. 60 % af "massen" (erkendte udslag) findes dybere end 2 m u. t., hvilket er lidt mere end bromidmængderne. Dette kan skyldes, at der er en tendens til at den injicerede væske generelt søger opad mod lavere tryk, og derfor kan observeres dybere i VCPT borerne. Herudover kan det også skyldes, at der i de dybere lag er større mulighed for at detektere den blå farve, hvis den er spredt i mere distinkte lag, men dette er spekulativt.

Der er ingen af de udførte VCPT sonderinger, der er helt tæt på DK borerne, hvilket vanskeliggør en direkte sammenligning, boring til boring.

#### *Overordnet teknisk sammenligning af metoder*

Der er i de foregående afsnit givet en kort diskussion af de enkelte metoders fund. Hvis man betragter de afprøvede metoder og prøver at sidestille dem vurderer vi, at der kan opstilles en "rangorden" som følger:

1. Kerner med bromid/sukker analyser. Bromidanalyserne forventes at give et rimeligt dækkende udtryk for, hvor sukkeret i melassen er blevet udbredt. I forhold til det udførte arbejde er der udtaget 48 m kerne af entreprenøren på en ca. 10 timers arbejdsdag med 2 mand. Tilsynet (2 mand) har opskåret, fotograferet og opdelt kernerne i løbet af samme arbejdstid. Med en systematiseret indsats, og uden fotografering etc., forventes det, at prøvehåndteringen kunne ordnes af 1 mand samt lidt hjælp fra entreprenøren. Dette giver et ca. tidsforbrug på 15 min/meter kerne. Ulempen er, at bromidanalysen er lavet på laboratoriet, hvilket ikke løser udfordringen i forhold til et dynamisk værktøj. Der skal derfor afprøves felt kit til måling før metoden er rigtig velegnet. Den vertikale opløsning er ligeledes lav, da der skal udføres en kemisk analyse pr. prøve, hvilket sætter begrænsninger.
2. ROST sonderinger. De udførte sonderinger indikerer, at denne metode har et fint potentiale med tryptofan som tracer. Følsomheden har ved den anvendte blanding dog ikke været tilstrækkelig til at mindre mængder har kunnet observeres. Der er derfor behov for at lave nogle flere "laboratorie" test for at kunne vurdere følsomhed, ligesom den anvendte blanding med mange kemikalier ikke har været optimal i forhold til metoden. I forhold til anvendelse med evt. oxidationsmidler vil der også være et behov for at dokumentere, at der ikke er effekter af dette på målingerne. Hastigheden på metoden har været høj. De 6 sonderinger til 8 m blev udført på 3-4 timer svarende til en hastighed på mindre end 5 min/meter. Den vertikale opløsning er høj, hvis der er tilstrækkelig med stof tilstede. Herudover blev der opsamlet CPT data, der også kan anvendes i forbindelse med karakterisering af jordens geotekniske egenskaber.

3. VCPT sonderinger. Videosonderingerne havde tekniske udfordringer på grund af selve udstyret, hvilket bevirkede at det ikke var muligt at udføre alle de ordrede sonderinger. Udover dette viste det sig relativt vanskeligt at udføre en ensartet vurdering af de optagne billeder og relativt tidskrævende. Selve sonderingerne var relativt hurtige med en hastighed på ca. 10 min/meter. Det er meget usikkert om der er tilstrækkelig farve i jorden til, at det visuelt vil kunne erkendes i større afstande fra injektionspunkterne, hvilket gør metoden meget lidt praktisk anvendelig. Metoden gav en række andre informationer omkring tilstedeværelse af sten, kornstørrelsesfordeling i sediment, vandansamlinger etc.
4. EC sonderinger. EC sonderingerne udviser en række udslag, der kun i meget dårligt omfang vurderes at kunne korreleres med tilstedeværelsen af større mængder af bromid som diskuteret ovenfor. Det er således meget usikkert, hvad det er, der giver de udslag der måles. Elektrodekonfigurationen i forhold til fordelingen i jorden vurderes at være den udslagsgivende faktor i forhold til, hvornår der detekteres bromid, således at det ikke er muligt at opnå reproducerbare konsistente målinger med det anvendte udstyr. Metoden er ellers hurtig og nem at anvende (hastighed som ROST) og ser derfor umiddelbart meget attraktiv ud, såfremt korrelationen kan forbedres.

## KONKLUSION

Der er ved injektionen og den efterfølgende databearbejdning konstateret følgende hovedkonklusioner:

- Tryk og flowdata fra injektionen viste, at der kunne konstateres en initial trykstigning inden flow opstod. Dette indikerer at der bliver dannet frakturer i jorden. Det kan ikke ud fra disse data konkluderes om bruddene opstår horisontalt eller langs med injektionsproben.
- De optagne kerner viste visuelt en meget spredt fordeling baseret på de visuelle fund af farve i kernerne.
- Bromidanalyserne viste, at der var bromid tilstede (svarende til væskespredning) i lidt mere end 50 % af de analyserede prøver. 60 % af bromidmassen blev fundet i de øverste 25 % af jordsøjlen (ned til 2 m u. t.). Der kunne ikke konstateres en entydig sammenhæng mellem afstand til injektionspunktet og tilstedeværelsen af bromid.
- De udførte ROST analyser viste overordnet en fordeling, der ligner det der observeres i bromidanalyserne. Følsomheden af metoden var dog med den anvendte sammensætning for lav sammenlignet med bromidanalyserne.
- De udførte videosonderinger viste overordnet en fordeling hvor en større del af massen lå i de dybere jordlag. Videosonderingerne var generelt tættere på injektionspunkterne end de andre testede metoder. På trods af dette blev der konstateret påvirkning i færre prøver end i bromidanalyserne. Vurderingen er samtidig tidskrævende og subjektiv.
- EC sonderingerne viste både med hensyn til hvor og hvor meget stof der var i jorden helt andre resultater end bromidanalyserne. Det er usikkert hvad årsagen præcist er, men der kræves sandsynligvis næsten direkte kontakt over dipolen af injiceret væske før der opstår et signifikant udslag.
- Sammenfattende vurderes det derfor at bromidanalyser eller analyser af det injicerede stof er den bedste metode set ud fra et teknisk synspunkt p.t. ROST metoden ser umiddelbart ud til at have et potentiale, men det vil kræve udvikling i forhold til afprøvning af højere koncentrationer af tryptofan og kombinationer af tryptofan og de stoffer hvis spredning der ønskes vurderet i nogle "laboratorie" forsøg før det endelige design kan opstilles.
- Prisen for dokumentation for kemiske analyser og ROST er af nogenlunde samme størrelsesorden. Det skønnes at den samlede omkostning er i størrelsen ca. 800 kr./ løbende meter dokumentationssondering, under forhold der minder om Vadsbyvej.



## SOIL MIXING

Seniorkonsulent Lisbeth Walsted, NIRAS  
Projektleder Anna Toft, Region Hovedstaden  
Udviklingskoordinator Mads Terkelsen, Region Hovedstaden  
Projektchef Kim R. Jensen, Arkil Miljøteknik A/S

## ATV JORD OG GRUNDVAND

Levering af reaktive stoffer i lavpermeable aflejringer.  
"It's a contact sport!"

Møde 16. juni 2011





## BAGGRUND OG FORMÅL

Erfaringer fra en tidligere udført oprensning af fri fase PCE forurening i Skuldelev, som bl.a. er præsenteret på ATV's vintermøder i Vingsted i 2009 og 2010, har vist, at der på relativt kort tid kan sikres en effektiv oprensning af aktuelle forurening ved tilsætning af bentonit samt reaktivt jern ved soil mixing teknikken. Oprensningen i Skuldelev blev udført i sandede aflejringer og ved anvendelse af en soil mixing enhed indlejet hos et amerikansk entreprenørfirma.

I marts 2010 indgik Region Hovedstaden, Arkil Miljøteknik og NIRAS en samarbejds- og udviklingsaftale.

Den fælles målsætning for samarbejdet i Partnerskabet er at udvikle en let tilgængelig og effektiv oprensningsmetode i lavpermeabel moræneler, baseret på soil mixing metoder og teknikker.

Som led i dette arbejde er der i perioden 2010-2011 produceret og testet en soil-mixing enhed, med en diameter på 1,0 m.

Formålet med testen er at afprøve den danskudviklede soil mixing enhed. I forbindelse hermed dokumenteres forhold vedrørende valg af bentonitslurry, doseringsflow- og mængde af bentonitslurry, omdrejnings- og nedbringningshastighed samt antal op-/nedroteringer udført med soil mixing enheden før/efter tilsætning af reaktant (jernpulver,  $(\text{Fe}^0)$ ) m.v.

Bentonit og jernpulver er i forbindelse med testafviklingen tilsat i koncentrationer på ca. 1% hhv. 2% (vægtprocent).

Testen med tilhørende forundersøgelser er gennemført på en uforurenet morænelerslokalitet i Greve.

## METODE

Metoden baserer sig på, at der indmixes et stabiliserende materiale (bentonit) samt et aktivt materiale (f.eks. jernpulver) til oprensningsområdet.

Opblandingen udført ved soil mixing metoden bevirker en forbedring af kontakten mellem forureningskomponenter og reaktivt jern, og hermed en mere effektiv oprensning af forureningen i umættet såvel som eventuel mættet zone.

## RESULTATER

På ATV mødet d. 16. juni 2011 præsenteres de foreløbige resultater af udførte soil mixing test i Greve.

Fokus vil her være rettet mod en præsentation af det udviklede mixer hoved samt den opblandings- og homogeniseringseffektivitet der er opnået i forbindelse med gennemførelse af i alt 8 testhuller til max. 7,5 m under terræn.



## OLIEFJERNELSE I PRAKSIS

Seniorprojektleder Jørgen Mølgaard Christensen, DGE

### **ATV JORD OG GRUNDVAND**

Levering af reaktive stoffer i lavpermeable aflejringer.  
"It's a contact sport!"

Møde 16. juni 2011



Biologiske behandlingsmetoder af olie- og benzinforurenede lokaliteter kan i sammenligning med bortgravning og andre traditionelle fysisk-kemiske teknikker være økonomisk og miljømæssigt fordelagtige. Imidlertid er det sjældent at de biologiske teknikker benyttes. Årsagerne til de begrænsede anvendelser skal primært søges i, at teknikkerne er vanskelige at håndtere og i at der endnu ikke er udarbejdet tilstrækkeligt materiale, der dokumenterer teknologierne under danske forhold.

Imidlertid har biologiske in-situ teknikker været anvendt med succes på en lang række olieforurenede lokaliteter her i landet gennem de seneste 10 år. Langt hovedparten af disse sager er projekteret og gennemført af folk, der i dag arbejder i DGE's in-situ gruppe.

Tidligere tiders skepsis overfor at lade mikroorganisme nedbryde en lang række forurenende stoffer er i dag svundet ind i takt med at forskerne har eftervist at flere og flere mikroorganismer kan nedbryde selv svært nedbrydelige stoffer, og der samtidig påvises flere nedbrydningsmekanismer for disse stoffer. Biologisk nedbrydning af de organiske forureninger er således muligt for alle gængse forureningstyper.

Udfordringerne ved en biologisk oprensning er:

- at bringe de nedbrydende mikroorganismer i kontakt med forureningskomponenterne
- at få igangsat den biologiske omsætning under de givne (geologiske) forhold og
- at opretholde den biologiske omsætning indtil forureningen er nedbragt til et acceptabelt niveau

I DGE og Biorem har vi arbejdet med disse problematikker i den seneste halve snes år, og har udviklet en lang række teknikker til at opnå tilfredsstillende resultater med alle de tre nævnte forhold. På dagens "casa-bazar" vil vi vise eksempler herpå og bl.a. berøre emnerne: Biogel, injektionsteknikker, opsprækninger, augmentering, bioreaktorer og bioceller.

På "case-bazaren" vil der også være lejlighed til at se eksempler på specifikke sager, hvor biologiske in-situ og on-site teknologier har været anvendt til fjernelse eller nedbringelse af forureninger med kulbrinter, herunder specielt gasolie.



# HVORDAN DOKUMENTERES INJEKTION I LAVPERMEABLE SILTEDE AFLEJRINGER

Civilingeniør Bernt Grosen, COWI  
Civilingeniør, ph.d. Kirsten Rügge, COWI  
Projektleder Peder Johansen, Region Hovedstaden.

## **ATV JORD OG GRUNDVAND**

Levering af reaktive stoffer i lavpermeable aflejringer.  
"It's a contact sport!"

Møde 16. juni 2011





## BAGGRUND

For *in situ* oprensning ved stimuleret reduktiv dechlorering (SRD), kemisk oxidation eller ved anvendelse af nul-valent jern er projektets succes oftest meget nært koblet til, i hvor høj grad det lykkes at få den nødvendige kontakt mellem de injicerede reaktive stoffer og forureningen. Region Hovedstaden har udført pilotforsøg med Direct Push injektion af en vandopløselig bromidtracer som forberedelse til en *in situ* oprensning af chlorerede opløsningsmidler på en ejendom i Hørsholm. Forsøget er inspireret af erfaringer fra fuldskalaforsøg i USA, som viser at injektion under pulserende tryk giver en forøget influensradius og en langt bedre fordeling af de injicerede stoffer i grundvandsmagasinet.

## FORMÅL

Formålet med pilotforsøget har været at bestemme influensradius og den vertikale fordeling af traceren, når der injiceres under pulserende tryk i lavpermeable sand- og siltaflejringer. Formålet har også været at sammenligne flere forskellige metoder til dokumentation af tracerens udbredelse for på den måde at vurdere, hvilken metode, der giver det mest pålidelige billede af udbredelsen.

## METODER

Der er udført injektion af tracer i et dybtliggende grundvandsmagasin i lavpermeable aflejringer bestående af vekslende lag af fint sand og silt. En teknik benævnt Sidewinder Tool<sup>TM</sup> er brugt til at generere det pulserende tryk ved injektionen. Anvendelse af pulserende tryk forventes at give anledning til en momentan elastisk udvidelse af formationens porerumfang. Herved er det muligt at forøge influensradius samt injicere en større mængde med en mere ensartet fordeling sammenlignet med en injektion udført under konstant tryk. Traceren er injiceret med en GeoProbe Direct Push rig med Sidewinder Tool<sup>TM</sup> udstyret direkte koblet på toppen af injektionssonden. Vertikalt er der injiceret i 16 punkter over dybden fra 5 til 20 m u.t. Den vertikale afstand mellem injektionspunkterne har varieret mellem 0,25 og 1 m. I hvert punkt er der injiceret mellem 50 og 1000 l bromidtracer i koncentrationer på omkring 7500 mg/l.

Der er udført ledningsevne målinger til kortlægning af tracerens udbredelse. Ledningsevne målingerne er suppleret med udtagning af niveauspecifikke vandprøver i enkelte punkter og udtagning af jordprøver for hver 10 cm til analyse for bromid. Der er udført en detaljeret geologisk beskrivelse af aflejringerne både i felten og i laboratoriet. Dette er underbygget af en række slemmeanalyser til bestemmelse af kornstørrelsesfordelingen. Endelig er der lavet overslag på den hydrauliske ledningsevne baseret på resultaterne af kornstørrelsesfordelingerne.

## RESULTATER

Sammenfattende viser forsøget, at selvom geologien er relativ homogen fordeler traceren sig fortrinsvist i isolerede permeable og vandførende horisonter og giver dermed en ujævn fordeling af den injicerede masse både horisontalt og vertikalt. Små forskelle i den hydrauliske ledningsevne både horisontalt og vertikalt i de enkelte geologiske lag vurderes at være styrende for tracerens udbredelse.

Forsøget viser, at analyse af jordprøver giver den mest detaljerede og robuste beskrivelse af tracerens udbredelse i formationen både horisontalt og vertikalt. Forsøget viser også, at der er en rimelig sammenhæng mellem ledningsevнемålingerne og indholdet af bromid i jordprøverne.

## KONKLUSION

Ved anvendelse af Direct Push metoden kombineret med pulserende tryk er det muligt at opnå influensradier på mere end 3 m i isolerede horisonter, men der skal tages hensyn til foretrukne strømningsveje i de mest permeable horisonter og den maksimale fortynding af de reaktive stoffer ved dimensionering af fuldskala oprensningen. Derfor anvendes en influensradius på 1,5 m ved fuldskalaoprensningen. Ud fra ledningsevнемålingerne og jordprøvetagningen er den vertikale afstand mellem injektionspunkterne fastlagt til 0,5 m ved fuldskalaoprensningen.

Ved en oprensning baseret på f.eks. SRD kan der i udvalgte punkter injiceres en bromidtracer sammen med donor og evt. bakteriekultur og herefter gennemføres ledningsevнемålinger. På denne måde er det muligt at vurdere de injicerede stoffers udbredelse, således at der kan udføres supplerende injektioner i områder, der ikke er påvirket tilstrækkeligt af de injicerede stoffer. Efterfølgende kan der udtages kerneprøver (jordprøver) til endelig dokumentation af donorens udbredelse.

# ERFARINGSOPSAMLING FRA 2 FULDSKALA APPLIKATIONER AF STIMULERET REDUKTIV DECHLORERING I MORÆNELER 5 ÅR EFTER INJEKTIONEN. ETABLERING AF REAKTIONSZONE, DONORFORDELING OG FORURENINGSFJERNELSE

Civilingeniør, ph.d. Katerina Tsitonaki, Orbicon A/S  
Ph.d.-studerende Ida Damgaard, DTU Miljø  
Ph.d.-studerende Julie Chambon, DTU Miljø  
Ph.d.-studerende Gry Janniche, DTU Miljø  
Lektor Mette Broholm, DTU Miljø

## **ATV JORD OG GRUNDVAND**

Levering af reaktive stoffer i lavpermeable aflejringer.  
"It's a contact sport!"

Møde 16. juni 2011



Orbicon A/S har på vegne af Miljøkontrollen, København gennemført afværgeforanstaltningerne for oprensning af forurening med chlorerede opløsningsmidler ved stimuleret in situ reduktiv dechlorering på to lokaliteter på Vesterbro i København i 2006. Den primære forurening findes på begge lokaliteter i et op til 8 m tykt morænelerslag, hvorfra der sker udsivning til det underliggende kalkmagasin. På den ene lokalitet, Gl. Kongevej 39, var der tale om særdeles kraftig forurening med TCE i kildeområdet – med koncentrationer i grundvandsprøver på op mod 700 mg/L, mens forureningsniveauet i fanen og på den anden lokalitet (Vestebrogade 116) var mere beskeden.

Afværgeforanstaltningerne blev på begge lokaliteter udført ved direkte injektion af melasse og dechlorerende kultur med specifikke nedbrydere (*Dehalococcoides*) leveret af Bioclear. Injektionerne er på begge lokaliteter udført med GeoProbe for hver 25 cm i kildeområde såvel som i forureningsfanerne i sekundært grundvand.

I perioden 2007-2010 er der gennemført monitoring af effekten af de gennemførte afværgeforanstaltninger på grundvandsprøver fra filtersatte borer på de to lokaliteter. Resultaterne for grundvandet indikerer, at der sker fundstændig omsætning af chlorerede opløsningsmidler til ethen. Dog er nedbrydningen ved seneste monitoringsrunder fundet stagnerende.

På den ene lokalitet, Gl. Kongevej 39, er der i foråret 2010 udført et dokumentationsprojekt i samarbejde med DTU, som omfattede udtagning af intakte lerkerner fra det behandlede område. Formålet var primært at vurdere oprensningseffektiviteten i ler matrixen, og om muligt, at få et indtryk af udbredelsen af donor i moræneleren. DTU har foretaget en detaljeret karakterisering af sammensætningen af TCE og nedbrydningsprodukter, tilstedeværelsen af fermenteringsprodukter fra donor i prøverne samt af geologien.

Ved sammenligning af resultaterne fra kerneprøverne med monitoringen på grundvandsprøver, ses sammensætning og koncentrationer overvejende at svare til forholdene i sandslirer/reaktionszoner og ikke at afspejle forholdene i hele ler matrix, hvor dechloreringsgraden er lavere. Dette viser, at det er nødvendigt med målinger på jord-/kerne-prøver evt. som supplement til MIP og vandprøver, når effekten af den stimulerede reduktive dechlorering undersøges.

I kernerne, udtaget inden for donor injektionsintervallet i kildeområdet (2-7 m u.t. i kildeområdet), er TCE overvejende omsat til cis-DCE. I dele af fanen ses videre omsætning til VC og ethen. I dele af kildeområdet og fanen er nedbrydningen begrænset til bioaktive zoner på op til ca. 5 cm omkring sandslirer og indslag af "blød" moræneler, mens der i en kerneboring i kildeområdet er observeret omsætning af alt TCE til cis-DCE over et interval på 1,8 m. Der observeredes rimelig overensstemmelse mellem zoner med nedbrydning og med fermenteringsprodukter fra donor. I kernerne udtaget uden for injektionsintervallerne er der kun konstateret et begrænset indhold af nedbrydningsprodukter.

Det estimeres, at der er sket en massereduktion for total mg chlorerede ethener i kerner fra behandlingsområderne på 25-45% siden iværksættelsen af afværgeforanstaltningen.



# FRAKTURERING – ET STIMULERENDE TILTAG

Projektleder Hasse Moos, DONG Energy

## **ATV JORD OG GRUNDVAND**

Levering af reaktive stoffer i lavpermeable aflejringer.  
"It's a contact sport!"

Møde 16. juni 2011





## STIMULERING – EN NØDVENDIGHED

En olie/gasbrønd kan ikke altid producere de ønskede eller beregnede mængder. Men er hydrokarbonerne og de rette egenskaber tilstede i reservoiret, kan man stimulere brønden til at producere bedre. Stimuleringsprocessen består i at pumpe enten sand eller syre ud i reservoiret, og derigennem forbedre forbindelsen mellem brønd og reservoir, såvel tæt på brønden som længere ude i reservoiret. Sandet, der anvendes, er særligt udvalgt for kornenes sfæricitet og styrke. Syren vælges for dens evne til at ætse formation bort og/eller rense poreåbninger. Afhængig af kravene til brøndens funktionalitet i produktionsfasen såvel som under færdiggørelse er brøndenes "completion" udført forskelligt.

Olie- og gasbrønde såvel som injektionsbrønde har alle samme formål, nemlig mest effektivt muligt at kontakte de reserver der ligger i reservoiret. Produktionsbrønde trækker på reservoirets tryk som drivkraft for at få hydrokarboner til overfladen, mens injektionsbrønde har til formål at øge reservoirtrykket for derigennem at øge produktionen i produktionsbrøndene. Der findes også deponeringsbrønde, som man anvender til at bortskaffe for eksempel vand eller gas, som man ikke ellers har mulighed for at eksportere. For alle brøndtyper er overvejelserne den samme, nemlig at gøre brønden økonomisk rentabel. Den skal i sig selv være en god forretning, ellers vil man ikke investere i den. Brønde er dyre, og det gør selvsagt ikke prisen lavere, at man har brug for en borerig, som kan stå på havets bund eller flyde i overfladen, mens man gennem specialdesignet udstyr borer gennem havbunden og ler/skiferlag og ned til reservoiret som typisk ligger mellem 1000 og 5000 meter under havbunden, afhængig af lokal geologi og vanddybde. Alene riggen koster mellem 100 og 500 kUSD/dag, og brøndenes pris varierer typisk mellem 40 og 100 MM USD. Afkastet er dog oftest afstemt med prisen.

Gode reservoirer er nemme at udvinde, dvs permeabiliteten er høj, og en stor mængde olie eller gas forefindes i ét stort aflukke uden nævneværdige barrierer, som bremser fluidernes transport hen til brøndene. Desværre er det ikke hovedreglen, at reservoirer er gode. Der er næsten altid en eller anden hage ved geologi eller fluiderne, som gør, at der skal arbejdes og investeres noget ekstra for at producere de mængder, der giver tilfredsstillende afkast. I øvrigt er det ikke blot brøndenes pris, man må tage i betragtning - også produktionsanlæg og infrastruktur samt afgifter til staten tager sin bid af kagen; for ikke at nævne de indledende aktiviteter med i det hele taget at finde felterne med seismiske undersøgelser, fortolkning og efterforskningsboringer.

En af de mest almindeligt forekommende barrierer mod fluidbevægelse i reservoirerne er permeabilitet, altså gennemtrængelighed. Oprindeligt blev gennemtrængelighed beskrevet fysisk af Darcy, ved hjælp af et eksperiment, hvor han pressede vand gennem sand. Han fandt, at

$$V = \frac{k \cdot \Delta p}{\mu \cdot \Delta l} \Rightarrow k = \frac{V \cdot \mu \cdot \Delta l}{\Delta p}$$

Hvor  $v$  = væskens resulterende hastighed,  $k$ =permeabiliteten i Darcy,  $\Delta p$  trykforskellen over længden  $\Delta l$ , og  $\mu$  væskens viskositet. Da væskens resulterende hastighed fortæller hvor hurtigt væsken strømmer i reservoiret (sandet), ser man hurtigt, at trykket er drivkraften, og  $k$  skal være så høj som muligt for at maksimere  $v$ . Lavpermeable reservoirer har lav  $k$  i stenmatricen. Kun hvor der er lokale opsprækninger flyder væsken bedre. Sprækker er altså en fordel, men da man ikke kan se sprækker på seismik, går det ikke an at planlægge efter at ramme dem. Det bliver svært at overtale chefen til at investere i det.

I 50'erne fandt man første gang på at danne sprækker kunstigt. Det var i lavpermeable reservoirer i USA, hvor man ikke kunne få olien til at flyde. Af Darcys lov følger, at når permeabiliteten er lav, er trykkets dissipation i reservoiret meget ringe.

Med andre ord, man vil kunne producere olien tæt på brønden hurtigt, hvorefter det vil gå meget langsomt. Derfor tænkte man – ganske korrekt – at hvis man kunne kontakte større områder af reservoiret end blot der, hvor brønden stak ned, ville man kunne trække på større reserver, og trykfaldet ville gå tilsvarende langsomt. Det virkede. I dag er brøndstimulering en stor forretning for alle operatører, der har kalkfelter og lavpermeable sandstensfelter. Man investerer i stimulering, så man kan få olien op hurtigere, og investeringerne dermed forrentes hurtigere.

Hovedparten af de danske felter i Nordsøen er kalkfelter. Det gælder Gorm, Dan, Skjold, Halldan, Tyra og Syd Arne. I begyndelsen (70'erne) borede man lodrette brønde gennem den olieholdige kalk, men fik ingen særlig imponerende rate ud af det. Senere lærte man at bore horisontalt (midt 80'erne), men heller ikke det gav den håbede effekt.

Det var først, da man begyndte at lave kunstig opsprækning fyldt med sand i slutningen af 80'erne, at olien for alvor begyndte at flyde, og derfra gik det stærkt. Senere påviste man, at det i visse tilfælde var en bedre forretning at stimulere med saltsyre, enten ved opsprækning eller ved vask af overfladen (matrixstimulering).

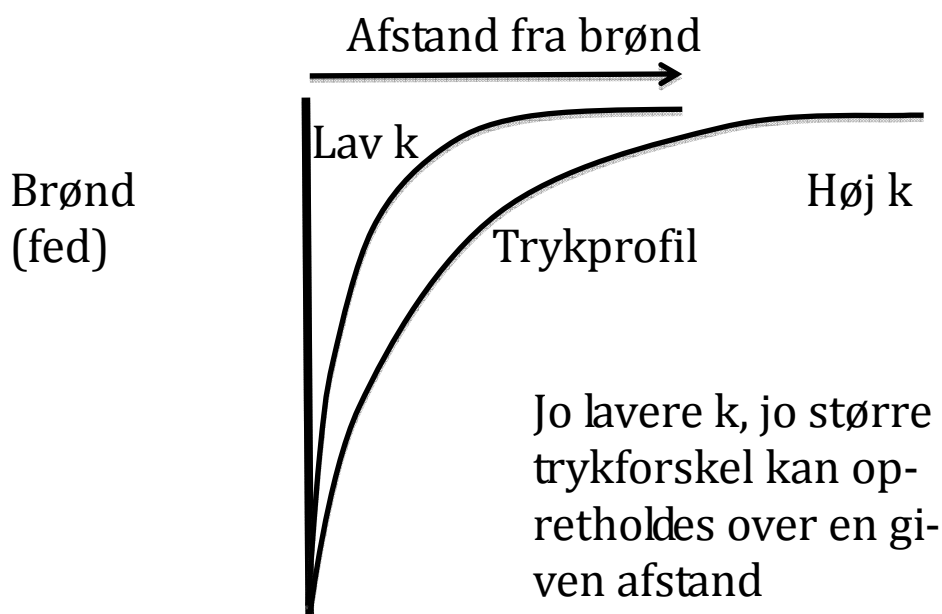
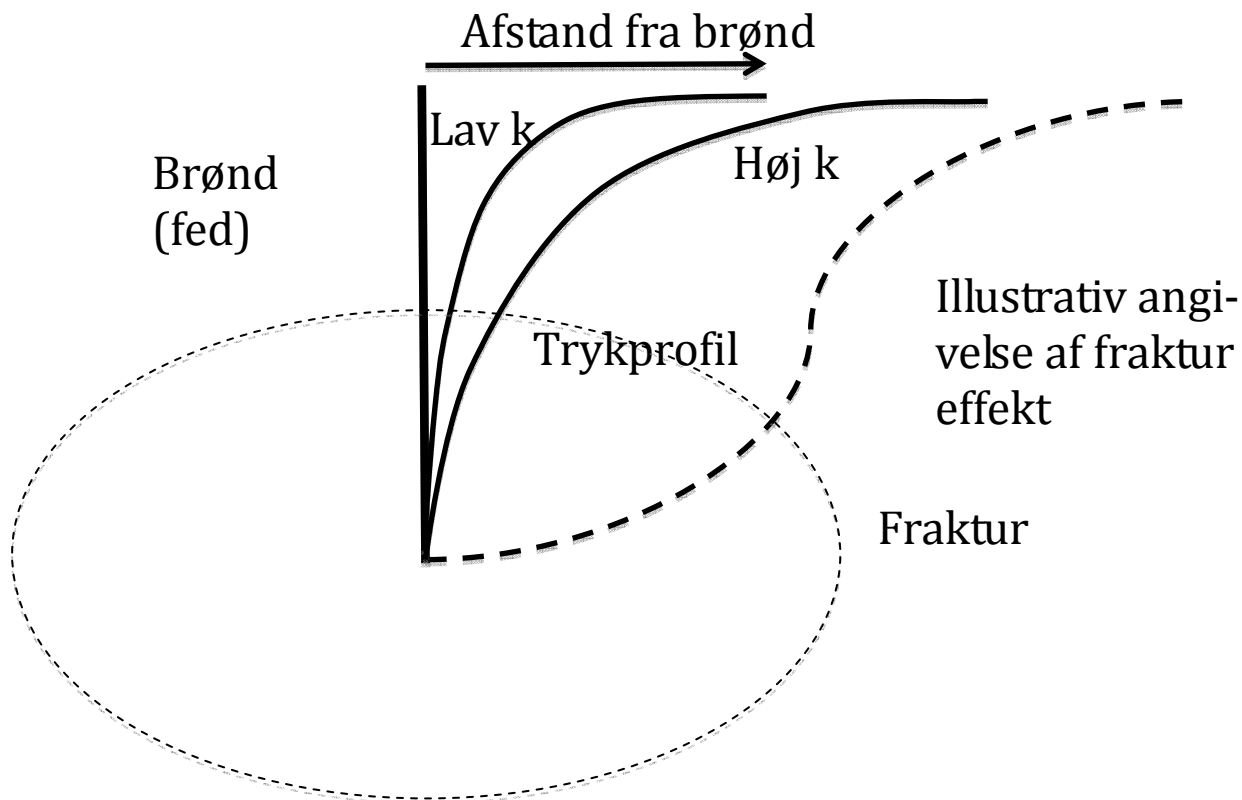


Illustration a k betydning for tilstrømning. Al udvinding bygger på, at reservoiret er permeabelt. Man kan ikke skabe permeabilitet i matricen, kun opsprækning af samme. Jo lavere k, jo større modstand mod strømning.

Opsprækning giver en meget lokaliseret, høj k, og langt bedre forbindelse mellem brønd og reservoir. I udkanten af frakturen får man samme trykprofil som fra en ustimuleret brønd, ud til reservoirets kant, men hvor frakturen kontakter reservoiret, får man et meget stort produk-

tionsbidrag.

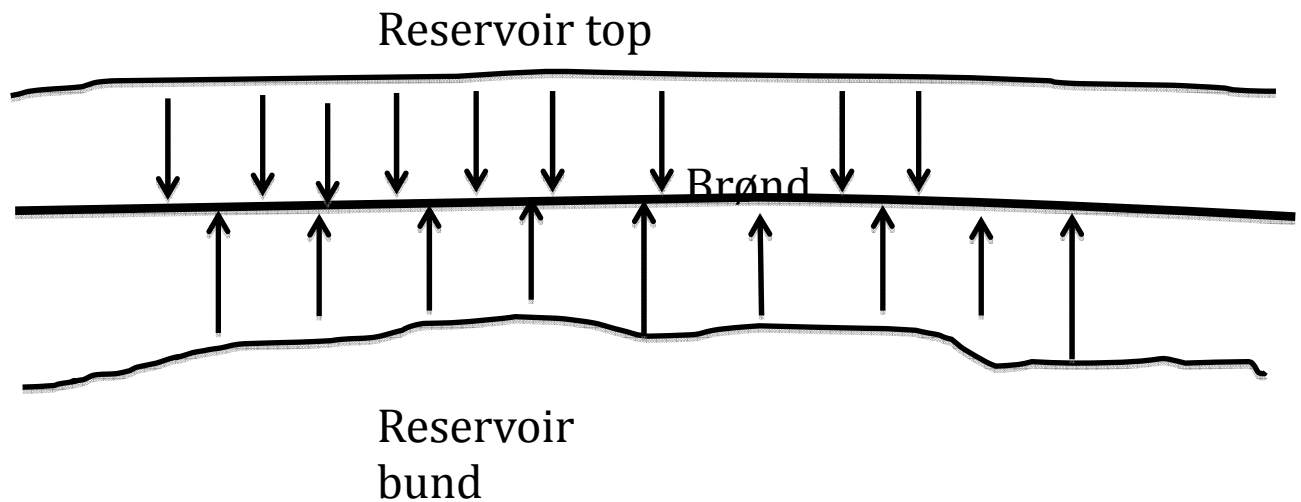
Nedenstående illustration viser, hvordan princippet fungerer. Inde i frakturen, som enten fyldes med sand eller efterlades tom (syrefrakturening), er konduktiviteten uendelig høj sammenlignet med reservoiret, og giver derfor ingen relativ modstand mod væskestrømning.



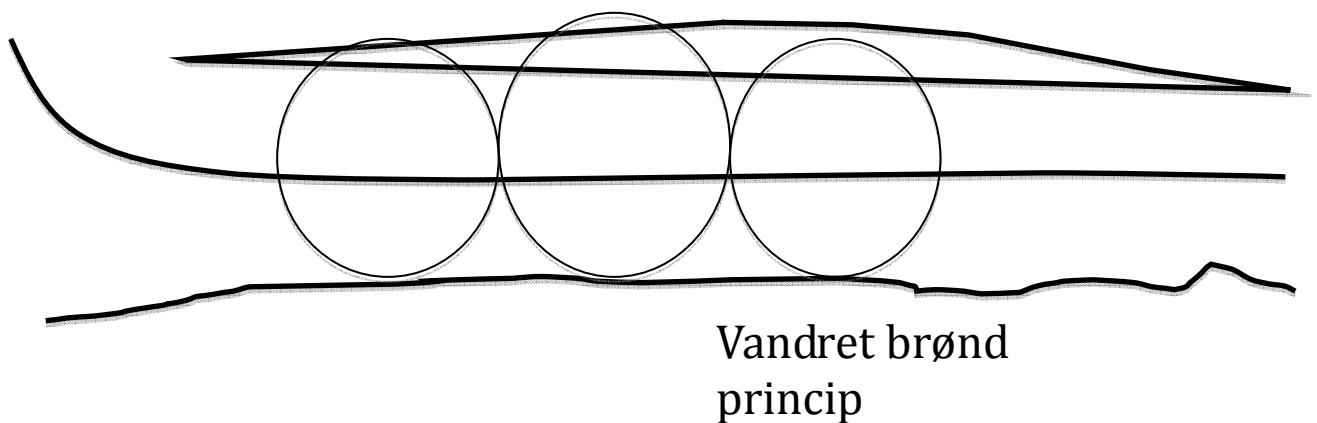
Sammen med Darcys lov ser man, hvor fordelagtig en stimulering kan være.

Det gælder både for producere og injektorer. I frakturen har man til at starte med såvel højt tryk som høj permeabilitet.

For en almindelig horisontal brønd uden stimulering ser flydevejen således ud:



Hver vektor illustrerer oliens vej. Stimulerer man ikke vil udvindingsgraden være lav, for et kalkreservoir, idet hver vektor kan oversættes som trykkurven for lavt  $k$ , se foregående figur. Når man frakturerer horisontale brønde ser de konceptuelt således ud:



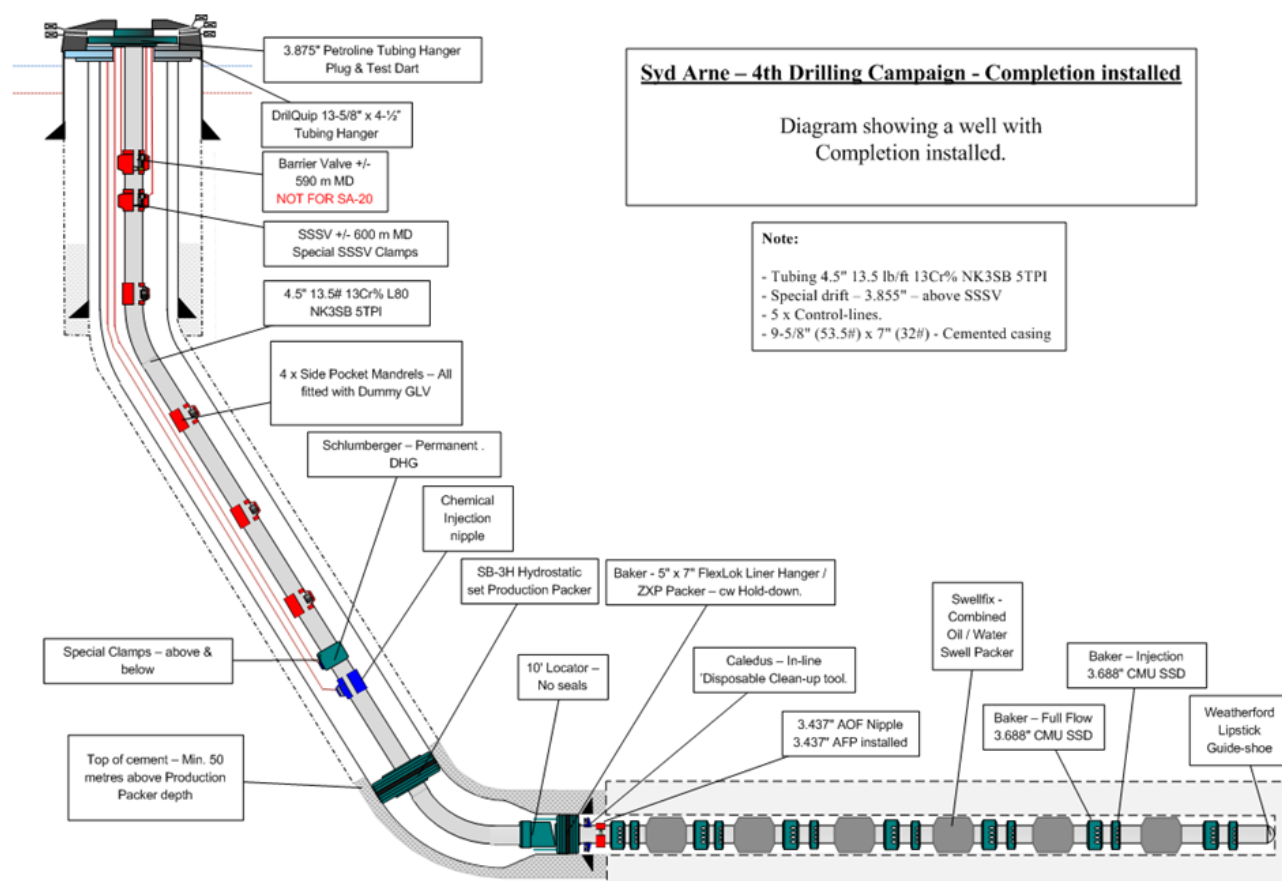
Brønden inddeles fra designfasen i zoner, som hver stimuleres individuelt. Samtidig med at stimuleringen foregår, eller før, anbringes en "completion", et stålrør med diverse ventiler og isoleringsmekanismer, således at man efter endt stimulering har adgang til zonerne individuelt. Når der fraktureres med sand, pumper man sandet i en polymer-baseret høj-viskøs væske (3000 – 6000 cP), som forhindrer sandet i at falde ud af væsken. Væsken nedbrydes med breakers et par timer efter, at behandlingen er færdig.

Når trykket aftager, kan stenen presse sammen igen, men denne gang om sandpakken. Sandet, der anvendes, er særlig sfærisk og købes gennem leverandører, der har adgang til miner, hvor sandet forekommer naturligt. Hvor de lokale spændingsforhold er mere intense,

anvendes kunstigt fremstillet sand, som regel fremstillet af en blanding af  $\text{SiO}_2$  og  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Frakturerne er lodrette, fordi de dannes vinkelret på den laveste spænding.

Man kan forestille sig, at hvis man frakturerer ganske tæt på jordoverfladen vil frakturen blive vandret; man vil løfte jorden. Nede i undergrunden er spændingerne defineret som  $\sigma_{\max}$  (største horisontalspænding) og  $\sigma_{\min}$ , mindste ditto. Frakturen vil udbrede sig langs med  $\sigma_{\max}$ , og åbne sig mod  $\sigma_{\min}$ . "Overburden" altså al den vægt jord og sten ovenover indvirker med, er langt større end horisontalspændingerne. Af samme grund undersøger man omhyggeligt de lokale spændingsforhold, således at brønde kan placeres langs med  $\sigma_{\max}$ , så frakturer dannes langsgående med brønden. Man skal forestille sig en vandret producerende brønd, der ligger parallelt med en vandret injektionsbrønd. Olien vil – i teorien – blive presset i en og samme linje fra injektor mod producer, og man vil således maksimere udvindingen uden at sænke trykket unødigt meget.

Når man stimulerer med syre, ætser man kalken bort. Hvis man pumper med høj nok rate kan man skabe frakturer med en inert, høj-viskøs væske, hvorefter syren kan følge og ætse formationen. Da naturligt forekommende kalk altid er heterogent på mikroskala, vil ætsningen afstedkomme forskelligt formede overflader på frakturvæggene, som dermed aldrig vil kunne lukke af for fluidstrømmen selvom trykket tages af, og frakturen lukker. Tilbage står lange, åbne kanaler ind i frakturen, med uendelig konduktivitet.



Completion er det rør som leder olien til overfladen. Ovenstående figur viser en typisk completion for en horisontal brønd i kalk. Hver zone er afgrænset og kan åbnes og lukkes individuelt.

